UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

MÉMOIRE D'ÉTUDIANT

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC H3C 3J7

ADAPTATION D'UNE MÉTHODOLOGIE POUR LA PLANIFICATION TACTIQUE DU TRANSPORT FERROVIAIRE DE MARCHANDISES

par

Marie-Christine Nicolle

Mémoire de maîtrise, département d'informatique et de recherche opérationnelle

Cette étude a été publiée grâce à une subvention du fonds F.C.A.R. pour l'aide et le soutien à la recherche

Université de Montréal

Centre de recherche sur les transports - Publication #500

Juin 1986

Dépôt légal - 2e trimestre 1987

RÉSUMÉ

Nous examinons le problème de la planification tactique des opérations pour le transport ferroviaire des marchandises et présentons une approche générale de modélisation qui en intègre les diverses composantes, relations et compromis. Nous discutons tout particulièrement des problèmes particuliers de modélisation rencontrés lors de l'application de cette méthodologie au cas du transport des marchandises en régime ordinaire à la S.N.C.F. Nous présentons également des résultats concernant les performances de l'algorithme et la qualité des solutions obtenues.

Mots-clés : transport, chemin de fer, marchandises, modèles d'optimisation, planification tactique.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
SOMMAIRE	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DU PROBLÈME	5
1.1 Problème général	5
1.2 Description des opérations	6
1.2.1 Sélection des services	7
1.2.2 Cheminement du trafic	7
1.2.3 Horaires des trains	7
1.2.4 Mouvement des locomotives	8
1.2.5 Mouvement des wagons vides	8
1.2.6 Politiques de rencontres/dépassements	8
1.2.7 Classification dans les gares de triage	8
1.2.8 Politiques de formation dans les gares de triage	9
1.2.9 Politiques de dispatching	9
1.3 Remarques	9
1.4 L'approche hiérarchique	10
1.4.1 Niveau stratégique	11
1.4.2 Niveau tactique	11
1.4.3 Niveau opérationnel	12
1.5 Le problème de la S.N.C.F.	12
1.6 Objectifs	14

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION 15

2.1 Structure générale 15

2.2 Modélisation des activités 20

2.2.1 Activités communes 20

2.2.2 Activités spécifiques à la S.N.C.F. 22

2.3 Le modèle 26

2.4 Remarques 27

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ALGORITHMIQUE 29

3.1 Algorithme général 29

3.1.1 Modification des fréquences 30

3.1.2 Affectation du trafic 32

3.2 Seuil minimal d'occupation des trains 34

3.3 Conclusion 35

CHAPITRE 4 : GÉNÉRATION DES SERVICES 36

4.1 Le problème 36

4.2 Le problème des M plus courts chemins 38

4.3 Énoncé des algorithmes 42

4.3.1 Algorithme de Dreyfus 42

4.3.2 Algorithme de Lawler 44

4.4 Performances - Remarques 45

CHAPITRE 5 : EXPÉRIMENTATION 50

5.1 Description des données 50

5.2 Stratégies de résolution 51

5.2.1 Services initiaux 51

5.2.2 Distribution du trafic 52

5.2.3 Modification des fréquences 52

5.2.4 Seuil minimal 54

5.3 Programmation 55

5.4 Performances 56

5.5 Solutions-Comparaisons avec MASUP 59

5.6 Conclusion 65

CONCLUSION 66

BIBLIOGRAPHIE 68

REMERCIEMENTS 70

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1	: Réseau physique et sous-réseau des services	37
TABLEAU 1	: Performances des algorithmes des M plus courts chemins	47
FIGURE 2	: Exemples de plus courts chemins	48
TABLEAU 2	: Classification des marchés	53
TABLEAU 3	: Description des deux problèmes	57
TABLEAU 4	: Exemple de l'effort de calcul nécessaire pour résoudre les deux problèmes	58
TABLEAU 5	: Caractéristiques physiques des cinq solutions	60
TABLEAU 6	: Caractéristiques économiques des cinq solutions	62
TABLEAU 7	: Répartition des coûts (en pourcentage) dans les cinq solutions	63
TABLEAU 8	: Répartition du nombre de services selon le niveau de fréquence (en pourcentage)	64

SOMMAIRE

Le transport ferroviaire des marchandises est une activité économique des plus importantes. C'est un problème qui peut se concevoir comme étant une suite de décisions que doivent prendre les autorités dans le but de répondre à la demande de service de la façon la plus adéquate possible. Le niveau de détail dans l'analyse menant aux décisions varie suivant le niveau de planification où l'on se situe.

La planification à moyen terme (tactique) des opérations d'une compagnie ferroviaire constitue un aspect important de ce problème. Son but est une affectation et une utilisation rationnelles, efficaces et économiques des ressources pour offrir un service de qualité.

Un modèle d'optimisation ayant pour but de répondre aux problèmes de planification tactique ainsi que l'algorithme pour solutionner efficacement un tel modèle ont été mis au point. Cette approche a été expérimentée, avec succès, à l'aide de données provenant d'une grande compagnie canadienne.

Étant donné que l'algorithme comporte une partie exacte et une partie heuristique et que le problème étudié possède plusieurs solutions ayant une même valeur de l'objectif, nous ne pouvons décrire en termes d'optimalité les solutions obtenues. De plus, l'efficacité de l'algorithme ayant été seulement testée sur des réseaux canadiens et aucun modèle ne pouvant inclure toutes les possibilités rencontrées dans la réalité, il est primordial de vérifier l'adaptabilité et les performances du modèle et de l'algorithme pour d'autres données significativement différentes. Le but de ce travail est donc de confronter l'approche de modélisation à une réalité différente pour déceler d'éventuels problèmes de formulation et tester

l'efficacité de l'algorithme pour un réseau physique différent.

Nous exposons d'abord le problème de la planification tactique du transport ferroviaire des marchandises, puis nous décrivons le modèle proposé et adapté à nos données et l'algorithme pour le résoudre. Nous traitons ensuite le problème de génération des services initiaux.

Le modèle a été expérimenté avec des données provenant de la S.N.C.F.. Les temps d'exécution se sont révélés très bons, ainsi que la solution obtenue que nous avons comparée à celle du modèle MASUP de la S.N.C.F., ce qui confirme que cette méthode permet une grande flexibilité d'utilisation et une adaptation simple et efficace aux problèmes de diverses compagnies.

Nous croyons, donc, que le modèle développé permet, par sa modularité et sa flexibilité, une modélisation correcte des divers aspects du transport ferroviaire et une adaptation réaliste au cas particulier de chaque entreprise.

INTRODUCTION

Le problème du transport ferroviaire des marchandises peut se concevoir comme étant une suite de décisions que doivent prendre les autorités dans le but de répondre à la demande de service de la façon la plus adéquate possible. Les décisions portent principalement sur l'acquisition et l'affectation des ressources et des pièces d'équipement. Le niveau de détail dans l'analyse menant aux décisions varie suivant le niveau de planification où l'on se situe.

Le transport ferroviaire des marchandises est une activité économique des plus importantes. C'est un système qui fait intervenir de grosses sommes d'argent, tant pour acquérir de l'équipement que pour l'utiliser, et qui exige des délais importants pour modifier son infrastructure. De plus, les grandes compagnies ferroviaires doivent effectuer des investissements massifs pour équiper les gares de triage, améliorer les voies dans le but d'éviter la congestion future et augmenter la qualité du service. Il y a donc des choix à faire au niveau des investissements entre l'équipement roulant et l'infrastructure.

Il est donc nécessaire que le transport ferroviaire soit efficace tant au niveau des coûts qu'au niveau de la qualité et de la fiabilité du service. L'amélioration constante des techniques de planification du développement et de l'utilisation du réseau ferroviaire constitue un des moyens d'assurer cette efficacité.

La planification à moyen terme (niveau tactique) des opérations d'une compagnie ferroviaire constitue un aspect important de ce problème. Son but est une affectation et une utilisation rationnelles, efficaces et économiques des ressources existantes en vue d'offrir un service de qualité.

Étant donné la complexité d'un tel problème, il est très important pour le planificateur d'avoir à sa portée des outils rapides, efficaces et précis. Les méthodes de recherche opérationnelle, programmation mathématique et les techniques informatiques constituent une approche privilégiée pour obtenir ces outils.

Un outil d'aide à la planification tactique-stratégique (moyen et long terme) des opérations d'un transporteur ferroviaire des marchandises est présentement mis au point (Crainic 86). Il se compose d'un noyau méthodologique, d'une interface et d'une banque de données. L'élément central du noyau méthodologique a été récemment développé: une approche de modélisation globale du problème de planification tactique des opérations (Crainic 84c) et l'algorithme pour résoudre efficacement le problème à l'aide d'un tel modèle (Crainic 86).

Cette approche a été expérimentée avec succès à l'aide de données provenant d'une grande compagnie ferroviaire canadienne (Crainic 84b) ainsi que sur des problèmes de camionnage de lots brisés (Roy 84, Delorme 86).

Le modèle tient compte des principaux aspects du processus de décision au niveau tactique de planification, de leurs interactions et impacts au niveau de tout le réseau et considère les compromis à réaliser entre des critères souvent contradictoires. Il permet ainsi d'améliorer le processus de planification par la génération et l'évaluation systématique et efficace d'un grand nombre de stratégies d'opérations.

Étant donné que l'algorithme comporte une partie exacte et une partie heuristique et que le problème étudié possède plusieurs solutions, nous ne pouvons pas décrire en termes d'optimalité les solutions obtenues. De plus, l'efficacité de l'algorithme ayant été seulement testée sur des grands réseaux canadiens et aucun modèle ne pouvant inclure toutes les possibilités rencontrées dans la réalité, il est primordial de vérifier l'adaptabilité et les performances du modèle et de l'algorithme pour d'au-

tres données significativement différentes tant au niveau de la demande, de l'organisation et fonctionnement du système, qu'au niveau de la topologie du réseau.

Le but de notre travail est donc de confronter l'approche de modélisation à une réalité différente pour déceler d'éventuels problèmes de formulation et tester l'efficacité de l'algorithme pour un réseau physique différent.

Voici maintenant les grandes lignes du mémoire.

Dans le premier chapitre, nous décrivons brièvement le transport ferroviaire des marchandises. Nous dégageons ainsi un ensemble de décisions composant le processus de planification ainsi que des critères pour leur classification. Nous concluons par l'énoncé du but de notre travail.

Le deuxième chapitre présente une revue de l'approche de modélisation et les modifications et adaptations effectuées pour le cas du régime ordinaire (R.O) de la S.N.C.F.. Nous introduisons la notion d'itinéraire, nous permettant de décrire complètement le cheminement du trafic pour chaque paire origine-destination. Nous insistons sur la modélisation des délais, coûts, relations et compromis associés aux activités considérées.

Dans le troisième chapitre, nous rappelons brièvement les grandes lignes de l'algorithme utilisé et nous concluons par quelques remarques sur les impacts des modifications et les problèmes de formulation rencontrés lors de l'expérimentation. Nous abordons ainsi le problème du seuil minimal d'occupation des trains (ou nombre minimal de wagons par train) et nous proposons une heuristique de post-optimisation pour le résoudre.

Le problème de la génération des services initiaux est présenté dans le quatrième chapitre, ce qui nous amène à décrire quelques méthodes pour déterminer les M plus courts chemins dans un réseau et nous énonçons les

algorithmes de deux de ces méthodes. Nous concluons le chapitre par un examen de leurs performances.

Dans le cinquième chapitre, nous décrivons le problème test. Les stratégies utilisées lors de la résolution sont précisées, ainsi que des résultats et comparaisons évaluant l'efficacité et la qualité de la solution obtenue.

Les dernières pages sont consacrées aux remarques générales sur la pertinence de cette étude, l'utilité de l'approche proposée et quelques suggestions concernant les recherches futures.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DU PROBLÈME

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement le transport ferroviaire des marchandises du point de vue de celui qui doit construire un ou des modèles pour le représenter. Le but est donc de décrire les principales opérations pour en faire ressortir une liste de décisions qui leur sont associées ainsi que de présenter des critères pour leur classification. Nous dégageons également les interactions qui existent entre les diverses opérations ainsi que des compromis qui doivent être réalisés au niveau de la prise de décision. Nous concluons par une courte description du problème de la S.N.C.F. et de l'objet de notre travail.

1.1 Problème général

Le trafic des marchandises dans un système ferroviaire est généralement décrit en termes de réseau. Pour un tel système, les noeuds représentent les gares, tandis que les arcs représentent les voies de chemins de fer reliant ces gares.

Sur ce réseau, le trafic se définit sur les arcs par un mouvement de trains, donc de wagons, alors qu'aux noeuds il subit une série d'opérations. Les activités sont alors divisées en :

- Opérations de noeuds se déroulant dans les gares;
- Opérations de ligne se déroulant sur les voies.

Voici maintenant, très rapidement, les étapes du processus du transport des marchandises.

Le processus débute par une commande de wagons de la part du client. Une fois les wagons chargés, ils sont transportés à la gare de triage

d'origine où ils sont classifiés et mis dans un bloc de wagons ayant une même destination de classification.

Le bloc est alors placé dans un train. Pendant le voyage, le train peut dépasser des convois à vitesse plus basse ou être dépassé par des convois à vitesse et priorité plus haute. Il peut également rencontrer un train circulant en sens inverse. Dans ce cas, le train non prioritaire doit attendre sur une voie d'évitement que la voie principale soit à nouveau libre.

Dans les gares de triage, les wagons peuvent être changés de train (transfert) ou être reclassifiés. A la destination, les wagons sont déchargés et préparés pour un nouveau voyage.

Examinons maintenant les opérations dans une gare de triage. Un train arrivant dans une gare pour une classification est introduit dans la zone d'accueil où la locomotive est enlevée et les wagons vérifiés. Ces derniers sont alors dirigés vers les voies de classification, chacun étant mis sur la voie correspondant à sa destination de classification. Les wagons ainsi triés sont réunis en bloc (ou lot): formation de wagons avec une même destination de classification, mais ayant possiblement une destination finale différente, voyageant comme un tout jusqu'à la première destination. Les blocs attendent dans la zone de départ pour être réunis dans le train qui sera vérifié une dernière fois avant le départ.

Tous les trains ne sont pas classifiés ainsi. Ils peuvent arrêter pour changer d'équipage, être vérifiés, être ravitaillés ou pour laisser des blocs ou/et en prendre.

Il est important de noter que les opérations de gares occupent la majeure partie du temps de voyage d'un wagon.

1.2 Description des opérations

Examinons maintenant les principales opérations.

1.2.1 Sélection des services

Il s'agit ici de déterminer quels chemins du réseau seront pourvus d'un service et à quelle fréquence (nombre de trains du service opérés sur la période considérée). Il faut également déterminer le type de service : local, direct ou avec un certain nombre d'arrêts intermédiaires, sa vitesse, sa priorité et autres caractéristiques qui sont directement influencées par les marchandises à transporter, le cheminement et les politiques dans les gares.

1.2.2 Cheminement du trafic

Le cheminement du flot de marchandises dans le réseau est une des principales activités qui influence de façon déterminante les autres opérations.

Pour chaque classe de trafic avec une origine et une destination données, le cheminement est spécifié par :

- Un chemin dans le réseau physique ;
- La suite de services de train empruntée ;
- Les opérations subies aux différentes gares sur le chemin.

En fixant une structure de cheminement pour toutes les classes de trafic, on détermine le flot sur chaque voie du réseau et donc le niveau minimum de service sur les voies ainsi que la quantité de travail à effectuer à chaque gare.

Notons qu'il est question ici de cheminement en termes de wagons et non en terme de trains comme dans la section précédente.

1.2.3 Horaires des trains

Une fois choisies les routes des trains et leur fréquence ainsi que le cheminement, un horaire spécifiant les mouvements des trains peut être construit. Pour chaque train, l'horaire précise l'heure d'arrivée et l'heure de départ pour chaque gare sur sa route. Notons qu'il n'est pas absolu-

ment nécessaire pour une compagnie de se munir d'un horaire et que de toute façon, si un horaire est construit, il n'a pas à être aussi précis et rigide qu'un horaire pour les trains de passagers ou les avions par exemple.

1.2.4 Mouvement des locomotives

Dans une compagnie de chemins de fer, la force motrice est indépendante des unités à transporter. De plus, le mouvement du trafic entraîne un débalancement de la répartition des locomotives; il faut alors s'assurer d'une distribution des unités motrices parmi les mouvements des trains. La distribution doit donc être effectuée de telle façon que la disponibilité de la force de traction pour chaque train prévu à l'horaire soit assurée et que, de plus, on obtienne un haut taux d'utilisation des locomotives.

1.2.5 Mouvement des wagons vides

Comme pour les locomotives, le mouvement du trafic cause un débalancement dans la distribution des wagons vides. Il faut donc prévoir un trafic de ces wagons pour contrer ce débalancement et assurer la disponibilité en wagons pour les voyages suivants. Une résolution efficace de ce problème permettra de diminuer le temps où le wagon est vide et ainsi permettra une diminution de la flotte.

1.2.6 Politiques de rencontres/dépassements

Dû à la capacité des voies de chemins de fer, spécialement dans le cas des voies simples, un certain nombre de rencontres et de dépassements ont lieu entre les trains. Un ensemble de règles est alors fixé pour définir les droits de passage et ainsi régir la circulation.

1.2.7 Classification dans les gares de triage

Les politiques de classification déterminent les groupes selon lesquels les wagons seront triés en vue de la formation des blocs pour les

mouvements ultérieurs. Elles doivent minimiser les coûts d'opération mais doivent également diminuer les délais encourus dans la gare, éviter la congestion et répartir le travail de classification dans toutes les gares. De plus, ces politiques sont très fortement reliées à celles de formation de train ainsi qu'à celles de cheminement et de sélection des routes.

1.2.8 Politiques de formation dans les gares de triage

Il s'agit des règles utilisées pour décider quels groupes de trafic doivent être mis sur chaque train. Ces politiques cherchent à diminuer les coûts de manutention ainsi que les délais dans les gares. On retrouve ici une très forte interaction entre les politiques de classification et les politiques de formation.

1.2.9 Politiques de dispatching

Un premier ensemble de ces politiques s'occupe de la bonne marche des opérations et de l'allocation intelligente des ressources à l'intérieur de la gare. Le deuxième ensemble, plus important, se relie au problème des horaires des trains. Ainsi, même si l'horaire est spécifié, des fluctuations dans le volume du trafic peut le modifier: retard d'un train jusqu'à ce qu'un certain volume de trafic soit disponible, annulation d'un train ou ajout d'un train supplémentaire s'il y a accroissement de la demande ou toute autre décision du même style.

Toutes ces règles forment un ensemble assez vaste de décisions, concernant la marche des trains, locales aux gares de triage, mais influençant grandement les performances du système en général.

1.3 Remarques

Il est important de noter que toutes ces politiques ont des effets sur tout le réseau et sont fortement interreliées. En effet, les décisions prises sur un ensemble de politiques influencent directement les décisions à prendre sur un autre ensemble. Par exemple, des liens existent entre les

politiques de classification, formation, sélection des services et cheminement du trafic. Ainsi, on peut envisager de transporter le trafic avec des services lents arrêtant et reclassifiant à toutes les gares. Cette option va amener des coûts d'opération relativement bas, mais augmente les délais et fait décroître la qualité du service.

A l'opposé, on peut décider d'utiliser seulement des trains directs entre toute paire origine-destination, éliminant ainsi la reclassification. Une telle politique diminue les délais, augmente la qualité et la fiabilité du service mais génère des coûts d'opération élevés. Entre ces deux extrêmes, nous pouvons imaginer une grande variété de politiques.

Ainsi, nous remarquons que des compromis sont à envisager entre les coûts d'opération et la qualité du service, tant au niveau d'un même ensemble de politiques que pour plusieurs opérations différentes mais en étroite relation les unes avec les autres. Il faut souligner qu'il ne s'agit pas d'une opposition complète entre les délais et les coûts d'opération, mais qu'un service de meilleure qualité, plus fréquent et plus fiable, va généralement coûter plus cher.

Il est donc important de traiter le problème au niveau de tout le réseau et de tenir compte non seulement des coûts d'opération mais aussi d'une mesure de la qualité du service (en général, des délais imposés au trafic) ainsi que des relations et compromis à réaliser entre ces critères pour obtenir un bon modèle d'optimisation du transport ferroviaire des marchandises. s performances du système en général.

1.4 L'approche hiérarchique

L'analyse de ces opérations, de leurs interactions et des compromis à faire est grandement facilitée si nous adoptons une approche hiérarchique du processus de planification (Assad 80, Payraud 81, Crainic 84a). En général, les décisions sont classées en trois niveaux selon leurs buts, leur

durée d'application et le niveau de direction.

1.4.1 Niveau stratégique

Il concerne le long terme, les investissements à engager et, à un niveau très général, l'équilibre coût/qualité à atteindre dans le transport, par exemple :

- Design et amélioration du réseau ;
- Emplacement des gares de triage ;
- Acquisition de ressources ;
- Planification à très long terme des services.

Quant aux décisions de cheminement, on peut les retrouver à ce niveau si des données très aggrégées sont utilisées.

1.4.2 Niveau tactique

Il concerne le moyen terme et l'allocation rationnelle et efficace des ressources. Les données doivent avoir un certain degré d'aggrégation, les décisions prises n'étant sensibles qu'à des modifications importantes des paramètres du problème. Les décisions à prendre ne tiennent pas compte des variations journalières et ont comme objectif l'amélioration des performances de tout le réseau :

- Sélection des services ;
- Cheminement du trafic ;
- Politiques de formation des trains ;
- Politiques de classification ;
- Allocation du travail de classification parmi les gares de triage ;
- Longueur des trains.

Ce sont les problèmes principaux que doit résoudre une compagnie de chemins de fer pour offrir un service rentable, économique et de qualité.

Tous ces problèmes s'influencent mutuellement à un très haut niveau et une modélisation complète de toutes ces relations s'avère assez difficile.

1.4.3 Niveau opérationnel

Il concerne les opérations au jour le jour, suivant les variations du trafic et les aléas de l'exploitation :

- Horaires des trains ;
- Horaires des activités d'entretien et de réparation ;
- Mouvement des locomotives ;
- Mouvement des wagons vides ;
- Politiques d'accueil ;
- Politiques de dispatching .

Cette classification doit bien sûr être nuancée. Par exemple, la répartition des wagons vides, des locomotives et la confection d'un horaire classées au niveau opérationnel font aussi l'objet de décisions au niveau tactique ou même statégique. Les différences entre les niveaux sont cependant évidentes tout comme les relations entre eux: chaque niveau prend ses grandes lignes de développement au niveau supérieur et se base sur les résultats du niveau inférieur.

Une approche de ce type est toutefois nécessaire pour des études de modèles informatiques d'aide au processus de planification. Aucun modèle ne peut espérer englober tous les aspects du transport ni répondre à la fois à toutes les questions qui sont posées à tous les niveaux de décision.

1.5 Le problème de la S.N.C.F.

Plus de 2000 wagons sont échangés chaque jour sur le réseau de la Société Nationale des Chemins de fer Français (S.N.C.F.) entre plus de 4000 points de vente (Payraud 81). Ces échanges sont très variés tant du point

de vue des origines et destinations que de la qualité du service demandé.

Le trafic des marchandises est partagé en deux régimes :

- Régime accéléré (R.A.) ;
- Régime ordinaire (R.O.).

Le régime accéléré concerne une part importante du trafic de marchandises de la S.N.C.F.. La notion d'horaire et de correspondance y est primordiale. Il est en fait développé d'une façon similaire au transport de passagers et utilise les mêmes techniques.

Le régime ordinaire englobe l'autre partie du trafic et est conçu comme un mode de transport économique qui obéit à des règles simples et généralisées à l'ensemble du trafic qu'il traite. Ces caractéristiques ainsi que l'importance du trafic concerné et des coûts qu'il représente en ont fait une cible de choix d'études de modélisation informatique des plans de transport.

Au niveau tactique, la modélisation a pour but de rechercher les plans d'acheminement les plus économiques et les plans horaires les mieux adaptés au trafic attendu. En régime ordinaire, le plan d'acheminement est établi indépendamment du plan horaire car la notion de correspondance n'y est pas prépondérante; le plan d'acheminement définit donc assez bien à lui seul le coût et la qualité du système global.

Le modèle MASUP (Modèle Analytique Simplifié à Usage Prospectif) de la S.N.C.F. a été à l'origine conçu comme un modèle du niveau stratégique. Son but était d'établir très rapidement des plans d'acheminement pour tester l'adaptation d'un réseau de triages envisagé à une ou plusieurs hypothèses de trafic. Le modèle a été ensuite développé pour en permettre l'utilisation au niveau tactique pour l'établissement des plans d'acheminement.

1.6 Objectifs

A la lumière de ces dernières remarques, l'objet de notre recherche est de confronter l'approche de modélisation développé (Crainic 84c, 86) à une réalité différente, ici le problème du régime ordinaire de la S.N.C.F., pour déceler d'éventuels problèmes de modélisation et tester l'efficacité de l'algorithme. Pour cela, nous avons comme éléments de comparaison le modèle MASUP (Payraud 81) et nous avons donc décidé d'adopter autant que possible les choix de modélisation incorporés dans MASUP.

L'objectif du modèle est d'intégrer les problèmes du niveau tactique pour une grande compagnie ferroviaire et d'offrir un ensemble de stratégies pour donner le meilleur service au meilleur coût possible pour satisfaire la demande de trafic, tout en considérant les caractéristiques et contraintes physiques du réseau.

Étant donné que l'algorithme comporte une partie exacte et une partie heuristique et que le problème étudié possède plusieurs solutions, nous ne pouvons pas décrire en termes d'optimalité la solution obtenue. De plus, aucun modèle ne pouvant intégrer toutes les possibilités rencontrées dans la réalité et le modèle n'ayant été testé que sur une grande compagnie ferroviaire canadienne, il est primordial de vérifier l'adaptabilité et l'efficacité du modèle et de l'algorithme sur des données significativement différentes, tant au niveau de la demande et de l'organisation qu'au niveau de la topologie du réseau.

Nous allons donc modéliser les problèmes spécifiques de la S.N.C.F., proposer et comparer les effets de modélisations alternatives pour certaines opérations. Puis, nous adapterons l'approche de résolution à notre nouveau modèle. Finalement, nous évaluerons les solutions et nous les comparerons avec les résultats de MASUP.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle de réseau pour la planification du transport ferroviaire des marchandises (Crainic 86,84c) en y ajoutant les modifications et adaptations nécessaires pour satisfaire le problème spécifique de la S.N.C.F. et pour rencontrer les mêmes exigences que le modèle MASUP.

L'approche de modélisation a pour but l'intégration des relations entre les diverses opérations et des compromis entre les coûts d'opération et la qualité du service. Pour cela, le problème de planification tactique est approché comme un problème d'optimisation pouvant être formulé et résolu à l'aide de techniques de programmation mathématique. La formulation est celle d'un problème de design de réseau de service multimode multiproduit avec un objectif de minimisation d'un coût généralisé qui tient compte des opérations, des délais, de la fiabilité du service, etc..

2.1 Structure générale

Le réseau de base du modèle est constitué du réseau physique $G_{ph}=(N,A_{ph})$ composé de l'ensemble N de noeuds représentant les gares du réseau (gares de triage, points de connexion, etc.) et de l'ensemble A_{ph} des voies reliant ces gares.

Il faut noter qu'un noeud peut représenter plus qu'une simple gare de triage. En effet, lors d'une planification à moyen terme, seules sont considérées les gares les plus importantes en terme de capacité et de volume de trafic manipulé. Cette aggrégation est nécessaire compte tenu de la taille des réseaux, plus de 4000 stations pour la S.N.C.F. (Payraud 81), et plus de 5000 pour le C.N. (Crainic 84b).

Les voies reliant les gares peuvent être des voies simples ou doubles et être de types différents (diesel, électrique), ce qui engendre des changements de traction, donc des délais supplémentaires, dans certaines gares.

Pour chaque paire origine-destination dans N, une demande, possiblement nulle et généralement décomposée selon les classes de trafic, est spécifiée.

Définissons donc :

marché m (ou (O,D,c)) : une paire origine-destination (O,D), O, D ε N, pour laquelle il y a une demande non-nulle d^m de trafic de classe c. L'ensemble de ces marchés sera dénoté M.

La demande est généralement mesurée en nombre de wagons ou possiblement dans une forme analogue de mesure de tonnage.

A partir d'un réseau physique G_{ph} et de la demande, on construit une structure de services G = (N,A) qui décrit les routes sur lesquelles peut opérer un service de train :

service $a_h \varepsilon A$ caractérisé par

- une origine $O(a_h) \varepsilon N$
- une destination $D(a_h) \varepsilon N$
- le chemin dans G_{ph} :

  $T_h^v = \{(i,j) \varepsilon A_{ph}$: (i,j) est sur le chemin $a_h\}$

- les arrêts intermédiaires :

  $T_h^g = \{j \varepsilon N$: j est sur le chemin a_h et le service arrête à j$\}$

- le type de service $v(a_h)$.

Définissons également :

P_{ij} = un chemin spécifié de i à j dans G_{ph}

$T_h^p = \{ P_{ij} : P_{ij} \subseteq T_h^v$, P_{ij} est parcouru sans arrêt intermédiaire $\}$

où T_h^p représente les chemins entre les gares où le service a_h doit arrêter.

Sur un tel service a_h, un train est formé à son origine et conserve son identité jusqu'à sa destination où il est défait. Le nombre de trains qui y sont opérés constitue la fréquence du service. Notons que pour la modélisation du problème de la S.N.C.F., nous avons utilisé un seul type de service, le service rapide (sans arrêt intermédiaire).

Pour un marché $m \in M$, le trafic emprunte généralement un seul chemin dans G_{ph}, sauf quand pour des raisons économiques ou de congestion, il se divise entre plusieurs chemins différents. Pour circuler sur ces chemins, le trafic emprunte un ou une suite de services. Les wagons sont classifiés à la gare d'origine mais peuvent être reclassifiés dans certaines gares intermédiaires.

Nous définissons alors :

<u>itinéraire k</u> : pour un marché $m \in M$, suite de services dans A empruntée pour transporter le trafic de O à D, ainsi que la spécification des opérations effectuées dans les gares intermédiaires.

Soit I^m l'ensemble de tous les itinéraires du marché m et pour un $k \in I^m$, définissons :

$S_k^c = \{ j \in N$: le trafic est (re)classifié à $j \}$

S_k^t = { $j \in N$: le trafic change de service (sans reclassification) à j }

S_k^r = { $a_h \in A$: spécifiant la suite de services empruntés}

S_k^v = { $(i,j) \in A_{ph}$: (i,j) est sur le chemin de l'itinéraire k }

Évidemment, tout en étant très précise, ce genre de définition génère un nombre invraisemblablement élevé d'itinéraires, c'est pourquoi une procédure de génération progressive de colonnes a été incluse dans l'algorithme.

À partir de ces notions, spécifions les variables de décision (mesurées sur la période d'optimisation) :

x_k^m : nombre de wagons du marché m sur l'itinéraire k
$\forall m \in M, \forall k \in I^m$

t_h : fréquence du service a_h $\forall a_h \in A$

regroupées en vecteurs :

$$x_m = (x_1^m, x_2^m, \ldots, x_{|I^m|}^m)^t$$

$$x = (x_1, x_2, \ldots, x_{|M|})^t$$

$$t = (t_1, t_2, \ldots, t_{|A|})^t$$

Sur le réseau G, les variables x_k^m représentent les flots du marché m circulant sur les arcs selon des chemins prédéfinis. Les contraintes de conservation de flot sont donc automatiquement satisfaites si la totalité du flot circulant sur les itinéraires d'un marché satisfait la demande:

$$\sum_{k \in I^m} x_m^m = d^m \qquad \forall m \in M$$

Puisque les flots des différents marchés doivent garder leurs identités, nous nous trouvons en présence d'un problème de multiflot (en formulation arc-chemin) sur le réseau G.

Le modèle général s'écrit alors :

$$\text{Minimiser } \Psi(x,t) = \sum_m \sum_k Z_k^m(x,t) + \sum_h Y_h(t) + P(x,t)$$

$$\text{Sujet à} \quad \sum_k x_k^m = d^m \qquad \text{pour tout } m$$

$$x^m \geq 0 \qquad \text{pour tout } m$$

$$t_h > 0 \text{ et entier} \qquad \text{pour tout } h$$

où les indices h,m,k réfèrent respectivement aux services, marchés et itinéraires pour chaque marché et où :

$Z_k^m(x,t)$: coût total (opération et délai) d'utilisation de l'itinéraire k pour acheminer le trafic du marché m ; la somme représente le coût "variable" d'acheminement du flot x par le réseau de service opéré selon la fréquence t;

$Y_k(t)$: coût total d'opération du service a_h; la somme représente le coût "fixe" d'offrir un réseau de service opéré au niveau t;

$P(x,t)$: termes spéciaux pour modéliser des relations spécifiques, telle la capacité des services, en utilisant des coûts de délai.

Ainsi, l'objectif représente le coût total du système : coûts d'acheminement du trafic plus les coûts relatifs à l'opération du système. C'est un coût généralisé dans le sens où tant les coûts d'opération que les coûts de temps sont considérés. Les termes de délai sont transformés en coût via des coûts unitaires de délai définis par l'usager pour chaque marché, type de service ou de véhicule.

La formulation génère un problème de multiflots, multiproduits, non linéaire et mixte, résolu par un algorithme de décomposition.

2.2 Modélisation des activités

Identifions maintenant plus précisément chaque composante de la fonction objectif.

2.2.1 Activités communes

Les activités communes sont les activités modelisées dans le modèle du C.N. qui n'ont pas été modifiées pour le problème de la S.N.C.F..

- Délai d'accumulation

La raison d'être et la principale activité des gares de triage est la classification des wagons.

Il arrive souvent, pour des raisons d'efficacité, qu'au lieu de classifier les wagons pour leur destination finale, on préfère les classifier pour une gare de triage intermédiaire où ils seront reclassifiés. Cela permet de réduire la congestion et d'assurer une meilleure distribution du travail de classification parmi les gares. En effet, les gares de triage ayant un nombre limité de voies de classification, l'application de cette politique évite d'avoir à assigner dans toutes les gares une voie de classification pour chaque destination. Aussi, un plus grand nombre de wagons avec une même destination de classification sont disponibles permettant de former plus rapidement des blocs. Pour modéliser cette politique, nous introduisons un délai d'accumulation qui suppose qu'un bloc doit avoir atteint une longueur minimum avant de pouvoir être assigné à un train et ainsi pénalise les blocs de petite taille.

Soient :

bl : taille minimum du bloc;

$S_k^m(j)$: la gare pour laquelle la classification est faite par la gare $j \in N$ sur l'itinéraire k du marché m;

X_{ji} : volume de trafic (en nombre de wagons) à classifier à la gare j pour une autre gare i, $(i,j) \in N$ où :

$$X_{ji} = \sum_{m} \sum_{k/j,i \in S_k^c \wedge i=S_k^m(j)} x_k^m \quad \text{et}$$

$$X_j = \sum_i X_{ji}$$

Alors, si on suppose que les wagons deviennent disponibles à intervalles réguliers, le délai moyen d'accumulation à la gare j pour une autre gare, i,j ε N, est :

$$\frac{1h\,(b1-1)}{2X_{ji}}$$

Nous étudierons dans la suite les autres délais générés dans les gares.

- Coûts d'opération dans les gares

Pour les coûts de manipulation des wagons, nous avons :

C_j^c : coût de classification à la gare j ;

C_j^t : coût de transfert à la gare j ;

ce qui donne pour un itinéraire k du marché m :

$$\{ \sum_{j \in S_k^c} C_j^c + \sum_{j \in S_k^t} C_j^f \} x_k^m$$

Nous considérons également les coûts de manipulation des trains dans les gares :

C_j^F : coût pour former un train à la gare j ;

C_j^D : coût pour défaire un train à la gare j .

Et le coût de manipulation des trains pour le service a_h est :

$$(C^F_{O(a_h)} + C^D_{D(a_h)}) \, t_h$$

- Coûts d'opération sur les voies

Ces coûts se répartissent entre les unités motrices et les wagons. Soient :

C_{ij}^m : coût de traction sur le segment (i,j) d'un wagon du marché m ;

C^h_{ij} : coût de traction sur le segment (i,j) d'un train du service a_h .

Alors, le coût d'opération pour un itinéraire k du marché m est :

$$\sum_{(i,j)\in S^v_k} C^m_{ij}\, x^m_k$$

et pour un service a_h :

$$\sum_{(i,j)\in T^v_h} C^h_{ij}\, t_h$$

2.2 Activités adaptées ou ajoutées pour la S.N.C.F.

- Délai de classification

La raison d'être et la principale opération des gares de triage est la classification des wagons pour former des blocs et l'assemblage de ces derniers en trains. Ces opérations entraînent des phénomènes de congestion qui génèrent des délais.

Les modèles de file d'attente semblent constituer un moyen extrêmement intéressant de modélisation des activités de gare de triage (Petersen 77, Turnquist 82). Ces modèles tiennent compte de la configuration des gares et d'une foule de détails de caractérisation, débouchant sur des modélisations satisfaisantes de la réalité. Cependant, pour un niveau tactique de planification, surtout lorsqu'on ne dispose que d'une quantité limitée d'informations et tenant compte du fait que nos gares sont un regroupement de gares considérées comme un tout, nous modélisons le passage à travers une gare de triage par une file d'attente M/M/1.

Soient :

t^c_j = le temps moyen de service, estimé à partir de la capacité maximum de la gare, nécessaire à un wagon pour passer à travers la gare de triage $j \in N$ pour une opération de classification;

lh = longueur en heures de la période de planification considérée;

X_j = quantité de travail de classification allouée à la gare $j \in N$ en wagons, où

$$X_j = \sum_m \sum_{k/j \in S_k^c} x_k^m$$

Alors, nous pouvons approximer le taux moyen d'arrivée par $X_j/1h$ en wagons/heure, et le délai moyen de classification à la gare $j \in N$ est égal au temps total d'attente dans une file M/M/1, soit :

$$\frac{1h\ t_j^c}{1h - t_j^c\ X_j}$$

Pour assurer la concordance avec MASUP, le délai de classification a également été modélisé comme T_j, le temps incompressible de passage à la gare j.

Dans ce cas, nous avons dû nous assurer que la capacité de triage, en wagons par jour, de chaque gare n'est pas dépassée. Cette restriction est traitée implicitement dans la formulation de file d'attente. Nous avons introduit un terme de pénalité :

$$P_c\ [\text{minimum}\ [0, c_j - X_j)]^2 \text{ pour chaque } j;$$

où c_j : capacité en wagons par jour de la gare $j \in N$;

P_c : coût de pénalité, généralement très élevé.

- <u>Délai de fréquence</u>

À chaque changement de service, soit après une classification ou après un simple transfert, les wagons doivent attendre qu'il y ait un train disponible pour les transporter jusqu'à la prochaine gare où ils doivent subir un opération. Ce délai de fréquence ou de connexion représente une mesure de la qualité du service.

Les files d'attente avec service en groupe constituent une bonne façon de modéliser ce délai (Petersen 71a-b, Turnquist 82) et il a été

montré récemment (Crainic 85b) comment déduire, en utilisant cette approche, un modèle du délai de fréquence qui tienne également compte des restrictions de capacités des services :

$$\frac{1h}{2t_h}\left(1 + \frac{\bar{X}_{jh}t_h}{(\alpha_h t_h - \tilde{X}_{jh})(\alpha_h t_h - \bar{X}_{jh} - \tilde{X}_{jh})}\right)$$

où α_h : capacité maximum d'un train du service a_h;

$X_{P_{ij}h}$: trafic sur le segment P_{ij} du service a_h ;

$\tilde{X}_{jh}$: nombre de wagons assignés au service a_h à la gare j ;

$\bar{X}_{jh}$: trafic déjà sur le service a_h ; $\bar{X}_{jh} = X_{P_{ij}h} - \tilde{X}_{jh}$.

Cependant, pour faciliter les comparaisons avec MASUP, nous avons conservé la formulation du délai de fréquence pour un service régulier sans capacité $a_h \in A$:

$$\frac{1h}{2t_h}$$

et le délai de fréquence pour un itinéraire k du marché m est alors :

$$\sum_{a_h \in S_k^r} \frac{1h}{2t_h} x_k^m$$

Les restrictions de la capacité du service sont alors modélisées comme un délai supplémentaire obtenu via une fonction de pénalité :

$$P_p \sum_{P_{ij} \in T_p^h} [\text{minimum } (0, X_{P_{ij}h} - \alpha_h t_h)]^2$$

où P_p = coût de pénalité généralement très élevé

$\alpha_h = \underset{(i,j) \in P_{ij}h}{\text{minimum}} \{\alpha_{ij}\}$, α_{ij} étant le nombre maximum de wagons pouvant circuler sur une voie (i,j) du réseau.

- Délai de transfert

De plus, chaque fois qu'un wagon change de service sans (re)classi-

fication, nous introduisons un délai de transfert f_j à la gare $j \in N$.
Alors, le délai de transfert pour un itinéraire k du marché m est :

$$\sum_{j \in S_k^t} f_j x_k^m$$

- Délai d'arrêt

Il faut également considérer le délai généré par le temps d'arrêt du service a_h à la gare j : b_{jh}.
Alors, le délai d'arrêt des trains sur un itinéraire k du marché m est :

$$\sum_{a_h \in S_k^r} \sum_{j \in S_k^r o\, T_h^g} b_{hj} x_k^m$$

où $j \in S_k^r o\, T_h^g$: le service a_h arrête à la gare j.

- Délais sur les voies

Au niveau où le modèle se situe, le facteur déterminant pour le délai moyen de parcours est constitué essentiellement par la congestion mesurée par le nombre de trains de chaque type de service circulant (dans les deux sens si la voie est simple) sur le segment de voie considéré.

L'approche classique exprime le délai en fonction du nombre de trains circulant sur la voie par des fonctions de congestion.

Malheureusement, le manque de données et la difficulté de calibrer certaines fonctions ne nous ont pas permis d'utiliser des formules de délais telles celles incluses dans la formulation initiale. Nous avons donc utilisé un temps de parcours constant a_{ij} pour chaque lien $(i,j) \in A_{ph}$.
La congestion et les caractéristiques du segment de voie sont cependant cachées dans le temps moyen de parcours à partir de données historiques.
Alors, le temps de parcours sur un itinéraire k du marché m est :

$$\sum_{(i,j)\in S_k^v} a_{ij} x_k^m$$

Il faut également calculer le délai total de parcours pour un train du service $a_h \in A$:

$$\left(\sum_{(i,j)\in T_h^v} a_{ij} + \sum_{j\in T_h^g} b_{hj} \right) t_h$$

- Seuil minimal d'occupation de train

Pour être économiquement rentables, les services de train doivent atteindre une charge minimum. Cette condition peut s'écrire sous la forme d'un ensemble de contraintes.

Soient Θ_h : charge minimum requise pour qu'un train du service a_h soit formé;

$X_{P_{ij}h}$: trafic sur le segment P_{ij} du service a_h.

Alors, l'ensemble de contraintes s'écrit :

$$X_{P_{ij}h} \geq \Theta_h t_h \text{ pour tout } h, \text{ tout } P_{ij} \in T_h^p.$$

Il est important de remarquer que ce type de contrainte n'était pas présent dans le modèle original.

2.3 Le modèle

Lorsque nous assignons des coûts unitaires de C_m et de C_h à chaque heure de délai pour, respectivement, un wagon du marché m et un train du service a_h, le modèle s'écrit :

Minimiser $\Psi(x,t) =$

$$\sum_m \sum_k \Big\{ \sum_{j \in S_k^c} \Big(C_m \Big(T_j + \frac{lh(bl-1)}{2X_{jS_k^m(j)}} \Big) + C_j^c \Big)$$

$$+ \sum_{j \in S_k^t} \Big(C_m f_j + C_j^f \Big) + \sum_{(i,j) \in S_k^v} (C_m a_{ij} + C_{ij}^m)$$

$$+ \sum_{a_h \in S_k^r} C_m \Big(\frac{lh}{2t_h} + \sum_{j \in S_k^r \circ T_h^g} b_{hj} \Big) \Big\} x_k^m$$

$$+ \sum_{a_h} \Big\{ C_h \Big(\sum_{(i,j) \in T_h^v} a_{ij} + \sum_{j \in T_h^g} b_{hj} \Big)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in T_h^v} C_{ij}^h + C_{O(a_h)}^F + C_{D(a_h)}^D \Big\} t_h$$

$$+ P_c \sum_{j \in N} [\min(0, c_j - X_j)]^2$$

$$+ P_p \sum_{a_h} \sum_{P_{ij} \in \Gamma_h^p} [\min(0, X_{P_{ij}h} - \alpha_h t_h)]^2$$

sujet à

$$\sum_k x_k^m = d^m \qquad \text{pour tout } m$$

$$X_{P_{ij}h} \geq \theta_h t_h \qquad \text{pour tout } h, \text{ tout } P_{ij} \in T^p{}_h$$

$$x_k^m \geq 0 \qquad \text{pour tout } m, \text{ tout } k$$

$$t_h \geq 0 \text{ et entier} \qquad \text{pour tout } h$$

2.4 Remarques

Nous avons introduit les contraintes de capacité (gares et trains) dans l'objectif sous la forme de fonction de pénalité imposée lors de la non-satisfaction des contraintes, en raison de la simplicité de cette solution (l'addition de ce terme n'engendre aucune complication théorique supplémentaire au niveau de l'objectif) mais surtout parce qu'elle respecte la philosophie du modèle. En effet, dans la formulation, les relations et compromis entre les différents éléments du modèle se placent au niveau de l'objectif et il est donc normal d'y placer aussi les

relations de capacité des gares et des trains. De plus, cette façon de traiter le problème forme une structure plus favorable au développement d'algorithmes efficaces.

Quand à la contrainte de seuil minimal d'occupation de train, nous l'avons d'abord introduite sous la forme d'une fonction de pénalité. Lors de l'expérimentation, nous avons toutefois constaté que cette méthode ne donnait pas de bons résultats. En voici brièvement les raisons :

- Dès le début de la résolution, toutes les fréquences de service sont initialisées à des valeurs arbitrairement hautes pour rendre tous les services accessibles , générant ainsi de grosses pénalités et donc une solution fortement irréalisable. Lors de la diminution des fréquences, la solution restera possiblement irréalisable, mais engendrera quand même une forte diminution de la fonction objectif;

- De plus, dans un problème de minimisation, une action qui rend la solution non réalisable mais moins coûteuse constitue souvent l'alternative la plus attrayante même lorsqu'on lui ajoute une pénalité.

Ces arguments sont malheureusement encore valables lorsqu'on envisage d'autres méthodes de substitution de contraintes telle la relaxation lagrangienne ou les méthodes de barrière.

Nous avons alors pensé à une approche heuristique de post-optimisation pour résoudre ce problème, qui sera présentée dans le chapitre suivant.

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, sauf le problème du seuil minimal, nous avons pu relativement facilement formuler les problèmes spécifiques de la S.N.C.F. selon le cadre du modèle. Ce modèle peut donc s'adapter simplement et de façon réaliste aux problèmes de chaque entreprise. Il nous reste, cependant, à vérifier si l'algorithme reste efficace pour ce nouveau problème.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION ALGORITHMIQUE

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement l'algorithme développé pour résoudre le modèle de multiflot non linéaire mixte énoncé dans le chapitre précédent (Crainic 86). Puis, nous présentons une heuristique de post-optimisation pour résoudre le problème de seuil minimal d'occupation des trains. Nous concluons le chapitre en évaluant l'impact des modifications apportées au modèle sur l'algorithme et les problèmes de formulation.

3.1 Algorithme général

Notons que, dans cette section, nous avons supprimé temporairement la contrainte de seuil minimal d'occupation de train. Ainsi, nous pouvons utiliser l'algorithme de Crainic. Nous étudierons cette contrainte dans la section suivante.

Comme nous l'avons vu précédément, le modèle s'écrit :

$$\text{Minimiser } \Psi(x,t)$$

$$\text{sujet à } \sum_k x_k^m - d^m = 0 \quad \text{pour tout } m \in M$$

$$x \geq 0$$

$$t \geq 0 \text{ et entier ,}$$

avec comme caractéristiques :

- L'absence de toute relation entre les marchés et les services, au niveau des contraintes ;
- Une fonction objectif non linéaire, pas nécessairement convexe, non séparable ni par marché, ni par service incluant tous les liens entre ces éléments.

Tenant compte de cette structure, un algorithme de décomposition, dont voici le schéma, a été développé (Crainic 86) :

Étape 0 : Initialisation

Étape 1 : Affectation du trafic

Étape 2 : Modification des fréquences

Étape 3 : Répéter 1 et 2 jusqu'à ce que l'amélioration de l'objectif soit inférieure à un seuil donné.

Précisons maintenant les grandes lignes de l'algorithme.

3.1.1 Modification des fréquences

Une fois l'affectation du trafic effectuée, il faut examiner la possibilité de modifier les fréquences et ainsi améliorer l'objectif.

Considérons le vecteur des différences finies $\Pi(\Delta)$, où Δ est un entier positif, s le nombre total de services et

$$\Pi_h(\Delta) = \Psi(\bar{x}, t_1, \ldots, t_{h-1}, t_h, t_{h+1}, \ldots, t_s) - \Psi(\bar{x}, t_1, \ldots, t_{h-1}, t_h - \Delta, t_{h+1}, \ldots, t_s) \text{ pour tout h.}$$

L'heuristique proposée initialise les fréquences à des valeurs relativement hautes (ainsi tous les services sont disponibles au début du processus) et les diminue graduellement, en tenant compte de la diminution de la fonction objectif estimée par $\Pi(\Delta)$. Alors à chaque itération, le nouveau vecteur des fréquences est obtenu comme suit :

- calculer $\Pi(1)$;
- trouver $u_h = \underset{1 \le k \le s}{\text{maximum}} \{\Pi_k(1) / \Pi_k(1) > 0\}$;
- si $u_h < \varepsilon$, pour un petit ε donné > 0, arrêter ;
- sinon, modifier la fréquence de service :

$$t_j = \begin{cases} t_j & \text{si } j \neq h \\ t_j - \Delta & \text{si } j = h \end{cases} \quad \text{où } \Delta \text{ est un entier positif donné.}$$

Pour déterminer Δ, deux stratégies sont possibles. Dans un premier cas, la fréquence n'est modifiée que d'une seule unité, ce qui a l'avantage de ne pas impliquer de coûts supplémentaires mais peut entrainer un plus grand nombre d'itérations du système global. Dans l'autre alternative, on fait exactement l'inverse : en investissant plus d'efforts dans l'évaluation d'un pas optimal entier pour la fréquence à modifier, on espère diminuer le nombre d'itérations.

Pour le moment, nous utiliserons la procédure suivante :

- Calculer $\Pi(1)$ et $\Pi(-1)$;
- Trouver :

$$u_h = \underset{1 \leq j \leq s}{\text{maximum}} \{ \Pi_j(1) / \Pi_j(1) > 0 \}$$

$$u_k = \underset{1 \leq j \leq s}{\text{maximum}} \{ \Pi_j(-1) / \Pi_j(-1) > 0 \}$$

$$u = \text{maximum} \{ u_h, u_k \}$$

- Si $u < \varepsilon$ pour un petit ε donné, alors arrêter ;
- Sinon, modifier les fréquences de la façon suivante :

$$t_j = \begin{cases} t_j - 1 \text{ si } u = u_h,\ j = h \\ t_j + 1 \text{ si } u = u_k,\ j = k \\ t_j \quad \text{sinon.} \end{cases}$$

Cette procédure ne résoud pas le problème exactement, mais nous assure à chaque étape une borne inférieure sur l'amélioration de la fonction objectif ainsi que l'intégralité des variables tout en étant beaucoup plus rapide qu'une méthode exacte. Notons qu'une modification des fréquences selon le critère proposé assure à chaque itération de l'algorithme global, une diminution de l'objectif d'au moins le $\Pi_h(\Delta)$ calculé, une redistribution subséquente du trafic pouvant améliorer encore cette valeur.

3.1.2 Affectation du trafic

Si on fixe les fréquences, le problème s'écrit :

Minimiser $\Psi(x,\bar{t})$

sujet à $\sum_k x_k^m = d^m$ pour tout m

$x_k^m > 0$ pour tout m, tout k.

Prenant avantage de la structure de cette formulation, le problème est résolu par une procédure de décomposition incluant un algorithme de génération des itinéraires.

Voici donc schématiquement la procédure de distribution du trafic, le niveau de service offert étant fixé et une distribution initiale connue :

Étape 1 :

Pour m = 1,2,...,m

- Fixer les variables de flot à leurs valeurs courantes, x_s, $s \neq m$;
- Générer i^m, le meilleur itinéraire pour la classe de trafic m, étant donné les conditions présentes;
- Si $i^m \notin I^m$, alors $I^m = I^m \cup \{i^m\}$;
- Résoudre le nouveau sous-problème :

Minimiser $\Phi(x_m)$

sujet à $\sum_k x_k^m = d^m$

$x_k^m > 0$ pour tout k dans I^m;

Étape 2 :

Si pour tout m, il existe un v_m tel que, pour tout k dans I_m :

$$\left.\frac{\delta\Psi(x,\bar{t})}{\delta x_k^m}\right|_{x_k^m=\bar{x}_k^m} \begin{cases} = -v_m & \text{si } \bar{x}_k^m > 0 \\ \geq -v_m & \text{si } \bar{x}_k^m = 0 \end{cases}$$

alors, arrêter;

sinon, répéter l'étape 1.

où M : nombre total de classes de trafic;

I^m : ensemble des itinéraires pour la classe de trafic m;

$\Phi(x_m) = \Psi(\bar{x}_1,\ldots,\bar{x}_{m-1},x_m,\bar{x}_{m+1},\ldots,\bar{x}_M,\bar{t})$.

Une solution x satisfaisant le critère d'arrêt de la procédure est un point réalisant les conditions de Kuhn-Tucker du problème et est appelé une solution stable. Notons que cette condition représente l'union des conditions de Kuhn-Tucker pour les M sous-problèmes. Donc, la procédure arrête quand, durant l'exécution du même cycle, une solution stable est obtenue pour toutes les classes de trafic.

Pour résoudre le sous-problème , les méthodes de descentes (Bazaraa 79) semblent appropriées. Dû à la structure particulière du problème, les expressions analytiques pour les directions de descente sont relativement faciles à dériver et une adaptation efficace de la méthode du gradient est implantée (Crainic 82).

L'objectif de l'algorithme de génération des itinéraires est d'obtenir des variables qui améliorent la solution courante. Donc, on cherche le "meilleur" itinéraire pour la classe de trafic m, étant donné le niveau de service et la congestion sur le réseau. Par définition, le "meilleur" itinéraire est l'itinéraire à coût unitaire minimal. Notons que ces coûts sont, en fait, des coûts marginaux.

Le problème consiste donc dans le meilleur choix d'une séquence de points de reclassification et d'une séquence de services de trains . Le processus, combinatoire dans son essence, peut être vu comme une variante du problème du chemin le plus court.

Les noeuds sont constitués par les gares de triage, tandis que pour les arcs, on considère explicitement les sous-chemins P_{ij} des services (un arc pour chaque sous-chemin), ce qui permet de tenir compte des transferts effectués entre les services ailleurs qu'à leurs points terminaux.

La procédure commence par déterminer les plus courts chemins entre tous les noeuds du réseau (c'est à dire les meilleurs services). Puis, par une procédure d'étiquetage (variante d'une procédure de chemin le plus court), elle cherche les meilleurs itinéraires.

Cette procédure de recherche des meilleurs itinéraires dépendant de la linéarité du réseau, il est important de la tester sur plusieurs réseaux topologiquement différents pour vérifier son efficacité et son adaptabilité.

3.2 Seuil minimal d'occupation des trains

Dans cette section, nous présentons l'algorithme de post-optimisation utilisé pour résoudre le problème du seuil minimal d'occupation des trains.

Rappelons d'abord la forme de l'ensemble des contraintes défini au cours de la modélisation :

$X_{P_{ij}h} > \theta_h t_h$ pour tout h, tout $P_{ij} \in T_h^p$,

où θ_h est la charge minimum pour qu'un train du service a_h soit formé.

Tenant compte de cette structure, voici l'heuristique proposée :

- Résoudre le problème sans tenir compte du seuil minimal d'occupation de train;
- Calculer $R_h = (\theta_h t_h - X_h)\, D_h$ pour tout $a_h \in A$

  où θ_h : charge minimum requise pour qu'un train du service a_h soit formé ;

  t_h : fréquence du service a_h ;

  X_h : nombre de wagons du service a_h ;

  D_h : longueur de la route du service a_h ;
- Si $R_h < 0$ arrêter;

Sinon vérifier s'il existe un chemin alternatif pour transporter le trafic du service a_h, c'est à dire si le réseau des services reste connexe. Si oui, mettre $t_h = 0$, réoptimiser et recalculer les mesures de non-réalisabilité (R_h).

Lorsque le problème est résolu, sans s'occuper du seuil minimal d'occupation de train, nous cherchons quel service viole le plus la contrainte, en tenant compte de la longueur du parcours. Nous vérifions alors, qu'il existe un chemin alternatif pour transporter le trafic de ce service. Si oui, nous le supprimons et nous réoptimisons.

Notons qu'il est facile d'introduire des notions de coûts dans cette procédure. Par exemple, on peut calculer les coûts impliqués dans le service et dans le chemin alternatif et déterminer lequel est le plus interéssant et estimer le coût supplémentaire pour respecter la contrainte.

Nous avons employé cette heuristique pour résoudre notre problème et nous étudierons, dans le chapitre 5, les résultats obtenus.

3.3 Conclusion

L'absence, pour la fonction objectif, de proprietés particulières (comme la stricte convexité, par exemple) ainsi que le fait que l'algorithme soit composé d'une partie exacte et d'une partie heuristique, nous empêchent de décrire en termes d'optimalité les solutions obtenues à l'aide de cet algorithme. Les variations du trafic et les incertitudes sur les coûts rendraient d'ailleurs cet optimum illusoire. Cependant, puisqu'à chaque itération, la valeur de l'objectif est améliorée, il est clair que nous obtenons une solution après un nombre fini d'étapes. Cette solution est alors considérée comme un optimum local du problème.

Malgré les modifications et adaptations apportées au modèle, nous n'avons pas modifié l'algorithme, sauf par l'ajout d'une heuristique de post-optimisation pour résoudre le problème du seuil minimal d'occupation des trains.

CHAPITRE 4

GÉNÉRATION DES SERVICES

Nous présentons ici le problème de la génération de la structure de services indispensable pour spécifier les routes sur lesquelles peut opérer un service de train.

Ainsi, nous décrivons deux méthodes pour déterminer les M plus courts chemins dans un réseau, et nous concluons le chapitre par quelques remarques sur la performance de chacune de ces méthodes.

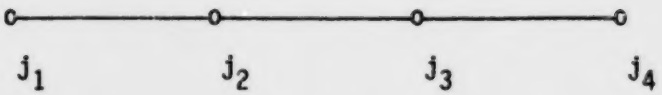
4.1 Le problème

Comme nous l'avons vu dans le deuxième chapitre, une structure de services doit être construite à partir du réseau physique, pour spécifier les services de trains offerts pour satisfaire la demande de transport.

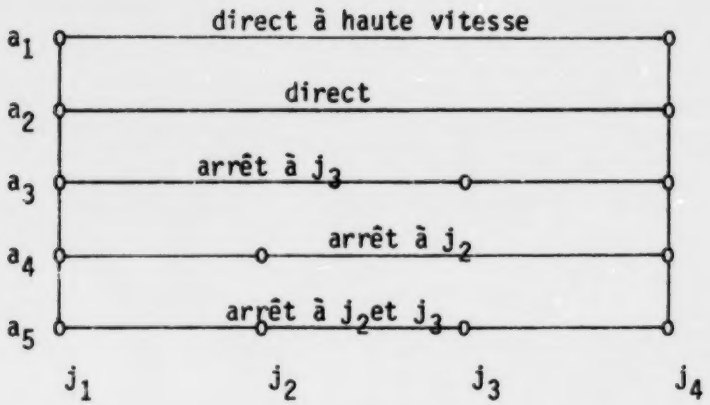
Chaque service est caractérisé par une origine, une destination, un chemin dans le réseau physique et les arrêts intermédiaires.

Sur un tel service, un train est formé à une origine et conserve son identité jusqu'à sa destination où il est défait. Le nombre de trains opérés sur un service constitue la fréquence du service.

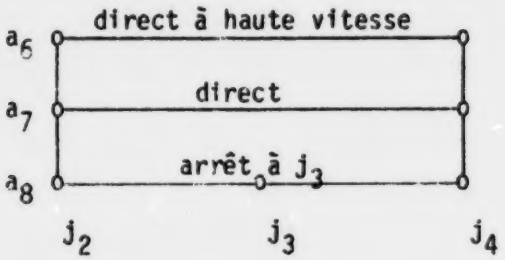
La figure 1 illustre ces notions par un exemple très simple d'un réseau linéaire de quatre stations où le trafic ne circule que dans une seule direction. Nous n'avons illustré que les services possibles entre j_1 et j_4 et entre j_2 et j_4. En examinant cette figure, nous remarquons que le nombre de services différents pour une paire origine-destination augmente avec le nombre d'arrêts intermédiaires et les types de service admissibles.



$G_{ph} = (N, A_{ph})$



Sur G = (N,A) les services de j_1 à j_4



Sur G = (N,A) les services de j_2 à j_4

FIGURE 1

Réseau physique et sous-réseaux des services

Pour chaque paire origine-destination une demande, possiblement nulle, de trafic est spécifiée. Habituellement, elle est mesurée en nombre de wagons.

Pour obtenir par la suite les meilleurs itinéraires, c'est-à-dire les plus économiques, les services de train ont généralement comme routes des chemins les plus courts ou les moins dispendieux. Dans le cas de la S.N.C.F., les services n'ont pas ou peu d'arrêts intermédiaires, aussi nous avons simplement généré des services directs. Déterminer les noeuds d'arrêts intermédiaires est un problème difficile pour une personne ne connaissant pas parfaitement le problème de chaque entreprise en particulier, et qui n'entre pas dans les buts de notre étude.

A la lumière de ces remarques, nous allons étudier la stratégie suivante : générer le chemin le plus court et un ou deux chemins différents pour que le trafic puisse s'y répartir en cas de congestion.

Nous allons donc déterminer les deux ou trois chemins les plus économiques en coût de traction, pour toutes les paires origine-destination ayant une demande de trafic supérieure à un nombre de wagons fixé au préalable. Ces coûts de traction dépendent de la distance à parcourir, du temps de parcours, du mode de traction et des éventuels changements de mode. Des trains directs sans arrêts intermédiaires, sont alors affectés sur ces chemins avec des fréquences initiales généralement arbitrairement hautes.

Le calcul de ces deux ou trois chemins les plus économiques se résume à un problème de M plus courts chemins.

4.2 Le problème des M plus courts chemins

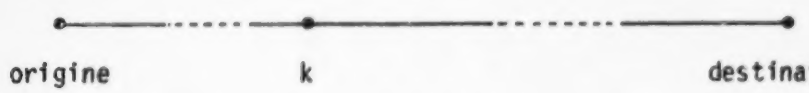
Il existe deux types de problème de M plus courts chemins. Le premier est de trouver M chemins, d'une origine vers une destination données,

ayant les plus courtes longueurs (ou les meilleurs coûts) et permettant plusieurs visites à un même noeud. Les algorithmes résolvant ce type de problème ont été proposés par Hoffman (59), Dreyfus (69) et autres.

Dans le second type de problème, il s'agit de déterminer M plus courts chemins d'une origine à une destination spécifiées, mais cette fois ne permettant pas les boucles. Bock (57), Clarke (63), Sakarovitch (66), Yen (71), Lawler (72) et autres ont développé des méthodes pour le résoudre.

Décrivons brièvement ces méthodes.

- Hoffman commence par déterminer les plus courts chemins entre tous les noeuds par un algorithme efficace (de type Dijkstra). Puis, toutes les déviations entre une origine et une destination spécifiées sont déterminées et comparées. Examinons à l'aide d'un schéma la notion de déviation:



Chemin le plus court de O à D

j

Chemin le plus court de O à k

Chemin le plus court de j à D

La meilleure déviation est le deuxième chemin le plus court. L'efficacité de cette méthode dépend de la structure du réseau.

- Dreyfus résoud simplement l'équation suivante par une méthode itérative :

(1) $u_j^{(m+1)} = \text{minimum} \{ u_k^{(\mu(k,j,m)+1)} + a_{kj} \}$

où $u_j^{(m)}$ = longueur du m-ième plus court chemin de l'origine au noeud j ;

$\mu(k,j,m)$ = nombre de chemins dans lesquels (k,j) est l'arc final, parmi les premier, deuxième, ..., m-ième plus courts chemins du noeud 1 au noeud j ;

a_{kj} = distance (ou coût) de l'arc (k,j) .

Cette méthode détermine les M plus courts chemins entre une origine et les (n-1) autres noeuds (si le réseau contient n noeuds) en un temps d'exécution de l'ordre de MnLOGn.

- Bock propose une procédure d'énumération qui détermine tous les chemins de l'origine à la destination, puis trie les M plus courts. Cet algorithme demande beaucoup de mémoire et un grand nombre de calculs. De plus, l'effort pour résoudre le problème est le même quelque soit M.

- Clarke propose une procédure de "branch and bound", l'efficacité de l'algorithme dépend de la topologie du réseau.

- Sakarovitch propose de déterminer H plus courts chemins, H > M, admettant les boucles par un algorithme efficace. Alors, parmi ces H chemins, on choisit les M ne contenant pas de noeuds redondants. Mais, même si l'algorithme de recherche des H chemins est très efficace, la performance de toute la méthode dépend de la structure du réseau et est difficilement évaluable.

- La stratégie de Lawler, qui est une amélioration de celle de Yen, est essentiellement comme suit. Soit $\bar{P}$ l'ensemble de tous les chemins (sans noeuds redondants) du noeud 1 au noeud n. Initialement, P_1 le plus court chemin dans $\bar{P}$ est calculé. $\bar{P}-\{P_1\}$ est alors partagé en sous-ensembles $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \ldots, \bar{P}_k$ où k<n-1 de telle façon qu'on puisse déterminer le plus court

chemin dans chaque sous-ensemble. Le plus court de ces chemins est clairement P_2, le deuxième plus court chemin. À une étape quelconque du processus, $\bar{P}-\{P_1,P_2,\ldots,P_m\}$ est partagé en $\bar{P}_1,\bar{P}_2,\ldots,\bar{P}_k$. Le plus court des plus courts chemins trouvés dans chacun de ces sous-ensembles est P_{m+1} le (m+1)-ième plus court chemin. Si $P_{m+1} \in \bar{P}_j$ alors $\bar{P}_j-\{P_{m+1}\}$ est partagé en au plus (n-1) sous-ensembles, qui avec $\bar{P}_1,\bar{P}_2,\ldots,\bar{P}_{j-1},\bar{P}_{j+1},\ldots,\bar{P}_k$ forment une partition de $\bar{P}-\{P_1,P_2,\ldots,P_{m+1}\}$.

Expliquons maintenant comment le partage des sous-ensembles est fait. Chaque sous-ensemble $\bar{P}_j$ appartenant à la partition $\bar{P} - \{P_1,P_2,\ldots,P_m\}$ contient tous les chemins :

a- qui incluent les arcs d'un chemin spécifié du noeud 1 à un noeud p;

b- de qui certains autres arcs partant du noeud p sont exclus.

Supposons que le chemin spécifié de 1 à p contient les arcs (1,2),(2,3),...,(p-1,p). Un chemin le plus court dans $\bar{P}_j$ est déterminé en cherchant un plus court chemin de p à n après la suppression des noeuds 1,2,...,p-1 et des arcs satisfaisant b-.

Supposons que $P_{m+1} \in \bar{P}_j$, et que P_{m+1} contient les arcs (1,2),(2,3),...,(q-1,q),(q,n) où q p.

- Si q = p, alors $\bar{P}_j - \{P_{m+1}\}$ contient tous les chemins incluant les arcs (1,2),(2,3),...,(p-1,p) et excluant l'arc (p,n) en plus des arcs partant de p exclus de $\bar{P}_j$.

- Si q > p, alors $\bar{P}_j - \{P_{m+1}\}$ est partagé en (q-p+1) sous-ensembles $\bar{P}'_1,\bar{P}'_2,\ldots,\bar{P}'_{q-p+1}$. P_1 contient tous les chemins incluant les arcs (1,2),(2,3),...,(p-1,p) et excluant (p,p+1) en plus des arcs partant de p exclus de $\bar{P}_j$. $\bar{P}'_k$, où 1 k q-p+1, contient tous les chemins incluant les arcs (1,2),(2,3),...,(p+k-2,p+k-1) et excluant (p+k-1,p+k). $\bar{P}'_{q-p+1}$ contient tous les chemins incluant les arcs (1,2),(2,3),...,(q-1,q) et excluant (q,n).

Cet algorithme trouve M chemins entre deux noeuds précis en un temps d'exécution de l'ordre de Mn^3 et il demande O(Mn) mots de mémoire en plus de celle requise normalement pour un problème de plus court chemin ordinaire.

L'efficacité de ces méthodes dépend souvent de la topologie du réseau physique et du nombre de plus courts chemins désiré. De plus, les chemins permettant les boucles ne sont évidemment pas admissibles (un train ne visite pas plusieurs fois la même gare durant le même voyage). Nous avons donc retenu les deux méthodes qui semblent les plus efficaces, celles de Lawler et celle de Sakarovitch en y intégrant l'algorithme de Dreyfus.

4.3 Énoncés des algorithmes

4.3.1 Algorithme de Dreyfus

Pour simplifier l'analyse, nous ferons les suppositions suivantes :

- Les chemins visitant plusieurs fois les mêmes noeuds sont admissibles ;
- Deux chemins sont considérés distincts s'ils ne visitent pas précisément les mêmes noeuds dans le même ordre ;
- Sans perte de généralité, nous supposons que seuls les M chemins du noeud 1 aux (n-1) autres noeuds sont désirés

Énoncons maintenant l'algorithme.

Initialisation :

$u_1^{(1)} = 0$;

$u_j^{(m)} = \infty$ pour tout j, pour tout m=1,...,M ;

$\mu(k,j,0) = 0$ pour tout (k,j) ;

$m = 0$.

Étape 1 : calculer $u_j^{(1)}$ pour tout j, c'est à dire trouver le chemin le plus court de l'origine aux (n-1) destinations.

Étape 2 : mettre à jour $\mu(k,j,m+1)$ de la façon suivante :

$$\mu(k,j,m+1) = \begin{cases} \mu(k,j,m)+1 & \text{si } (k,j) \text{ est l'arc final du} \\ & (m+1)\text{-ième chemin de 1 à j} \\ \mu(k,j,m) & \text{sinon} \end{cases}$$

m = m + 1

si m = M c'est fini, on a trouvé tous les chemins désirés.

Étape 3 : calculer $u_j^{(m+1)}$ pour tout j de la façon suivante :

$$u_1^{(m+1)} = \underset{k}{\text{minimum}} \{ u_k^{(m)} + a_{k1} \}$$

Pour chaque noeud j dont le plus court chemin depuis l'origine contient un seul arc, calculer :

$$u_j^{(m+1)} = \underset{k}{\text{minimum}} \{ u_1^{(m+1)} + a_{1j}, \underset{k\neq 1}{\text{minimum}} (u_k^{(m)} + a_{kj}) \}$$

Pour chaque noeud j dont le plus court chemin depuis l'origine contient deux arcs (1,i) et (i,j) calculer :

$$u_j^{(m+1)} = \text{minimum} \{ u_i^{(m+1)} + a_{ij}, \underset{k\neq i}{\text{minimum}} (u_k^{(m)} + a_{kj}) \}$$

Continuer pour tous les noeuds j dont les plus courts chemins de 1 à j contiennent 3,4,...,(n-1) arcs.

Retourner à l'étape 2.

Si le réseau contient des arcs négatifs, le calcul de $u_j^{(1)}$ pour tout j demande un temps d'exécution de l'ordre de n^3 et de n^2 si tous les arcs sont positifs. Pour le calcul de $u_j^{(m+1)}$ pour un j, n additions et comparaisons sont nécessaires, mais le temps d'exécution peut être réduit à l'ordre de LOGn. Donc, pour calculer $u_j^{(m)}$, pour tout j, le temps d'exécution est de l'ordre de MnLOGn en plus du temps requis pour la détermination du premier chemin le plus court.

4.3.2 Algorithme de Lawler

Ici, les chemins ne peuvent pas visiter plusieurs fois le même noeud. Sans perte de généralité, nous supposons que seuls les M plus courts chemins du noeud 1 au noeud n sont désirés.

Étape 0 : trouver le plus court chemin du noeud 1 au noeud n ;
le placer dans une liste ;
m = 1.

Étape 1 : si la liste est vide, arrêter, il n'y a plus de chemin de 1 à n ;
sinon, enlever le plus court chemin de la liste, l'imprimer comme P_m.

Étape 2 : supposons sans perte de généralité que P_m contient les arcs (1,2),(2,3),...,(q-1,q),(q,n) et que P_m est le m-ième plus court chemin de 1 à n sujet aux conditions suivantes :

- il contient les arcs (1,2),(2,3),...,(p-1,p) où p<q ;
- certains arcs à partir du noeud p sont exclus ;

Si p = q, trouver le plus court chemin de 1 à n sujet à :

- les arcs (1,2),(2,3),...,(p-1,p) sont inclus ;
- l'arc (p,n) est exclu de P_m

si ce chemin existe, le placer dans la liste ;

Si p < q trouver les (q-p-1) plus courts chemins sujet respectivement aux conditions suivantes :

(1) les arcs (1,2),(2,3),...,(p-1,p) sont inclus et l'arc (p,p+1) est exclu de P_m ;

(2) les arcs (1,2),(2,3),...,(p,p+1) sont inclus et l'arc (p+1,p+2) est exclu de P^m ;

.
.
.

(q-p-2) les arcs (1,2),(2,3),...,(q-2,q-1) sont inclus et l'arc(q-1,q) est exclu de P^m ;

(q-p-1) les arcs (1,2),(2,3),...,(q-1,p) sont inclus et l'arc (q,n) est exclu de P^m ;

Placer chacun des ces chemins dans la liste ;

m = m + 1 ;

aller à l'étape 1.

L'algorithme calcule $\underline{O(Mn)}$ plus courts chemins. Chacun de ces chemins est déterminé en un temps de l'ordre de $\underline{n^2}$. Alors, le temps total d'exécution est de l'ordre de $\underline{Mn^3}$.

4.4 Performances-Remarques

Ces deux algorithmes ont été programmé en Fortran sur le CYBER 835 (Latour 86). Nous les avons modifiés et adaptés pour notre problème. Pour chaque arc, nous avons introduit sa distance, son temps de parcours et son mode de traction. Ainsi, nous pouvons calculer le coût de traction pour tous les arcs du réseau. De plus, lors d'un changement de mode de traction dans une gare, un coût supplémentaire intervient. Nous déterminons alors les services en considérant tous ces éléments.

Nous avons testé les deux algorithmes sur le réseau de la S.N.C.F.. Il est constitué de 104 noeuds et de 156 arcs (voies doubles). Parmi ces noeuds, seulement 46 peuvent générer ou terminer des services.

Nous voulons déterminer les deux premiers chemins les plus économiques pour toutes les paires origine-destination qui ont une demande de trafic supérieure à 15 wagons par jour. Notons que nous supprimons le deuxième chemin si son coût est supérieur de plus de 10% du coût du premier.

Pour pouvoir estimer l'efficacité des deux algorithmes, nous compa-

rons quelques mesures de performances obtenues pour la résolution du problème décrit plus haut (tableau 1).

Nous générons 194 chemins les plus économiques en coût de traction et au maximum 91 deuxièmes chemins sans boucles satisfaisant la contrainte sur les coûts (coût inférieur à celui du premier chemin plus 10 %). En examinant le tableau 1, nous remarquons que l'algorithme de Dreyfus est beaucoup plus rapide que celui de Lawler, mais, il faut déterminer les cinq premiers chemins les plus courts pour obtenir 83 deuxièmes chemins sans boucles (le temps mis pour trier ces chemins n'est d'ailleurs pas inclus dans le tableau 1).

De plus, en utilisant ces méthodes et avec la structure particulière du réseau, les deuxièmes, troisièmes,...,Mièmes chemins ne sont souvent que des petites déviations par rapport au chemin principal. En examinant la figure 2 qui représente trois exemples de trois plus courts chemins (les nombres représentent les noeuds, donc les gares, les → indiquent un arc direct entre deux gares), on remarque que les deuxièmes et troisièmes chemins sont presque identiques au premier excepté pour quelques noeuds.

Le but du chemin alternatif étant d'éviter la congestion et la surcharge de trafic sur une voie de faible capacité, les résultats obtenus ne sont pas concluants. Les méthodes pour déterminer les M chemins les plus courts, étudiées ici, ne sont donc pas adaptées à notre problème.

Une stratégie possible, pour résoudre ce problème, consiste à générer automatiquement les plus courts chemins entre les paires origine-destination ayant une demande suffisament élevée. Ensuite, en examinant la demande et la capacité des gares et voies, des arrêts intermédiaires et des chemins alternatifs sont ajoutés manuellement. Pour les gares, on peut par

	Temps C/P	Nombre de premiers chemins	Nombre de deuxièmes chemins (sans boucles)
Lawler 1 chemin	68.81	194	---
Dreyfus 1 chemin	44.83	194	---
Lawler 2 chemins	270.77	194	91
Dreyfus 2 chemins	60.16	194	71
Dreyfus 3 chemins	76.14	194	73
Dreyfus 5 chemins	99.87	194	83

TABLEAU 1

Performances des deux algorithmes des M plus courts chemins.

1- 15 → 16 → 12 → 55 → 94 → 95 → 59 → 97 → 60 → 99 → 61 → 65 → 64

2- 15 → 16 → 12 → 55 → 94 → 95 → 59 → 97 → 98 → 99 → 61 → 65 → 64

3- 15 → 16 → 12 → 55 → 94 → 95 → 59 → 97 → 98 →101 → 65 → 64

1- 29 → 84 → 83 → 82 → 26

2- 29 → 84 → 83 → 82 → 27 → 26

3- 29 → 84 → 28 → 83 → 82 → 26

1- 37 → 89 → 35 → 48 → 49 →102 → 50 → 74 → 17

2- 37 → 89 → 35 → 48 → 49 →102 → 50 → 74 → 2 → 17

3- 37 → 89 → 35 → 48 → 49 →102 → 50 → 74 → 73 → 1 → 17

Déviations par rapport au plus court chemin

Chemins sans boucles

FIGURE 2

Exemples de plus courts chemins

exemple, prendre les plus courts chemins et les copier en y incluant des arrêts intermédiaires dans les gares ayant une demande ou une offre importante et se situant sur le parcours. Ces modifications manuelles seraient d'ailleurs plus efficaces et plus rapides avec une structure interactive graphique.

Finalement, nous avons montré ici que les méthodes traditionnelles pour résoudre le problème des M plus courts chemins ne fonctionnent pas de façon satisfaisante pour générer les services de train. Il reste donc beaucoup de travail à effectuer pour arriver à une génération automatique des services et une procédure mi-automatique mi-manuelle (interactive) serait probablement plus efficace.

CHAPITRE 5

EXPÉRIMENTATION

Dans ce chapitre, nous donnons d'abord la description du problème test utilisé pour notre expérimentation. Puis, nous décrivons les diverses stratégies utilisées lors de la résolution et leurs influences sur le comportement de l'algorithme. Le chapitre s'achève avec une mesure de la performance et de l'efficacité du modèle et de l'algorithme.

5.1 Description des données

Le problème utilisé lors de l'expérimentation examine la planification du transport ferroviaire de marchandises par le régime ordinaire de la S.N.C.F.. Le même problème a été résolu par le modèle MASUP et nous avons utilisé les mêmes données et le même degré d'aggrégation des données.

Nous avons un réseau de 104 noeuds et 156 arcs. Parmi ces noeuds, 46 représentent des gares de triage dont 20 seulement permettent le transit (classification), les autres sont des gares où seules sont possibles les opérations de distribution et de ramassage. Pour chaque gare de triage, nous connaissons la capacité maximale en wagons par jour, le temps incompressible de passage et le coût de classification d'un wagon.

Tous les arcs du réseau sont des voies doubles. Pour chaque arc, nous connaissons sa longueur, son temps moyen de parcours, son mode de traction et son tonnage maximum, donc son nombre maximum de wagons par train. La S.N.C.F. considère qu'un train est bien chargé s'il transporte au moins 70% de sa capacité maximale.

Sur le réseau, nous avons 4 modes de traction :

- Diesel ;
- Bicourant ;
- 25000 V ;
- 1500 V .

Pour chacun de ces modes, nous connaissons les coûts horaires et kilométriques des machines, des trains et des wagons, ainsi que le délai supplémentaire lors d'un changement de mode.

La période de planification utilisée est la journée (24 heures).

Nous avons 1475 marchés au total pour un seul groupe de marchandises.

5.2 Stratégies de résolution

Examinons maintenant les diverses stratégies utilisées pour diminuer le temps d'exécution du processus.

5.2.1 Services initiaux

Pour créer les services initiaux, nous avons d'abord généré les deux chemins les plus courts en coût de traction pour toutes les paires origine-destination ayant une demande de trafic supérieure à 15 wagons par jour. Des services supplémentaires ont été rajoutés pour que le réseau des services soit connexe, c'est à dire pour qu'au minimum un service origine et se destine à chaque gare de triage.

Lors de l'expérimentation, nous avons remarqué que le trafic apparaissait seulement sur les premiers services (les meilleurs), les autres ayant une fréquence nulle. En examinant la demande, on remarque qu'il n'y a pas de réelle congestion sur les voies, donc que le chemin alternatif n'est pas nécessaire. De plus, comme nous l'avons noté précédemment, les deuxièmes services obtenus par les algorithmes des M plus courts chemins ne sont généralement que de légères déviations des premiers. Nous avons alors

supprimé tous les chemins alternatifs, nous obtenons ainsi 237 services directs. D'après la demande et les résultats de MASUP, la fréquence initiale de ces services a été mise à une valeur arbitrairement haute de 8 trains par jour.

5.2.2 Distribution du trafic

La réoptimisation de la distribution du trafic pour un marché est la procédure dont la fréquence d'exécution est la plus haute. Nous avons donc séparé les marchés en trois catégories (tableau 2) :

- Les "gros" dont la demande est supérieure à 40 wagons par jour ;
- Les "petits" dont la demande est comprise entre 7 et 40 wagons par jour ;
- Les "très petits" dont la demande est inférieure à 7 wagons par jour .

Nous avons commencé par optimiser en considérant seulement les "gros" et les "petits" marchés. Puis, nous avons introduit les "très petits" en affectant leur demande sur les meilleurs itinéraires générés par arbre. Pour trouver le meilleur itinéraire entre une paire origine-destination donnée, on construit, du moins en partie, l'arbre des meilleurs itinéraires dont la racine est l'origine. Nous générons, ainsi, une seule fois, l'arbre à partir d'un noeud donné. Cette génération se fait lorsqu'une nouvelle origine est rencontrée durant un cycle de réoptimisation. Nous avons alors réoptimisé jusqu'à l'obtention d'une solution stable. Cette stratégie permet d'obtenir des réductions significatives du temps de calcul.

5.2.3 Modification des fréquences

Quant à la modification des fréquences, nous avons utilisé les mêmes stratégies que lors de l'expérimentation sur le réseau du C.N. (Crainic 82). Elles visent toutes à réduire le nombre de réoptimisations de la distribution du trafic :

Demande en nombre de wagons par jour	nombre de marchés	nombre de marchés en pourcentage	nombre de wagons en pourcentage
"gros"marchés $40<d$	43	2.7	20.75
"petits"marchés $7<d\leq 40$	468	29.7	56.02
"très petits"marchés $0<d\leq 7$	1064	67.6	23.23

TABLEAU 2

Classification des marchés

- Diminuer toutes les fréquences de la moitié de l'intervalle entre la valeur actuelle et la valeur minimum nécessaire pour transporter le trafic assigné au service ;
- Ramener toutes les fréquences à des valeurs supérieures de une unité à la valeur minimale ;
- Entre deux réoptimisations de la distribution du trafic, répéter plusieurs fois la procédure de diminution des fréquences .

Nous avons utilisé la première stratégie seulement au début du processus pour obtenir une bonne solution initiale. Elle a l'avantage d'accélérer la résolution, mais ne tenant pas compte des relations entre les services, elle n'est pas très précise.

La deuxième partie du processus débute par une application de la deuxième stratégie. La troisième est utilisée jusqu'à la fin, avec vingt répétitions de la procédure de diminution des fréquences entre deux réoptimisations de la distribution du trafic. Lorsqu'aucune fréquence ne peut être diminuée, nous vérifions si certaines doivent être augmentées. Si oui, nous réappliquons ensuite la troisième stratégie, si nécessaire.

5.2.4 Seuil minimal

Nous avons utilisé diverses stratégies pour diminuer le temps d'exécution de cette procédure.

Nous avons d'abord examiné plus attentivement les fréquences de service. Dans certains cas, elles sont trop élevées par rapport au nombre de wagons transportés sur le service. Il suffit de diminuer ces fréquences de quelques unités pour qu'elles satisfassent la contrainte. Alors, si $t_h > 1$, nous diminuons la fréquence du service a_h d'une unité (au lieu de supprimer ce service). Ainsi, nous n'avons pas besoin de déterminer un chemin alternatif.

Au niveau de la distribution du trafic lors de la post-optimisation, nous avons adopté une méthode semblable à celle utilisée dans le programme principal. Nous optimisons les "très petits" marchés seulement une fois lors de l'annulation d'une fréquence de service ne satisfaisant pas la contrainte de seuil minimal d'occupation de train. Les autres marchés, "gros" et "petits" sont optimisés trois fois. Quand tous les services satisfont la contrainte, nous réoptimisons une dernière fois sur tous les marchés. Comme pour le programme principal, cette façon de procéder réduit significativement les temps de calcul et nous obtenons quand même une bonne solution.

Quand à la modification de fréquences, la aussi, nous utilisons les mêmes stratégies que dans le programme principal. Lorsqu'une fréquence est annulée (service ne satisfaisant pas la contrainte), nous augmentons les fréquences (celles n'ayant jamais été diminuées à cause de la contrainte du seuil minimal d'occupation de train) de une ou deux unités, puis nous appliquons la troisième stratégie. Et, nous répétons cette procédure à chaque fois qu'une fréquence devient nulle et tant que cette contrainte n'est pas satisfaite pour tous les services.

5.3 Programmation

Les programmes ont été écrits pour résoudre le problème du C.N. (Crainic 82) en Fortran sur l'ordinateur Cyber 835/855 de l'Université de Montréal. Nous les avons modifiés pour notre nouveau modèle et nos nouvelles données. Nous avons introduit les quatre modes de traction et les coûts de changement de mode. La nouvelle fonction de pénalité (capacité dans les gares) a été ajoutée et l'autre (capacité des trains) a été modifiée. Nous avons adapté les calculs de la nouvelle fonction objectif, calculé les nouvelles dérivées et la nouvelle fonction de différences finies ($\Pi_h(\Delta)$). Finalement, nous avons programmé la procédure de post-optimisation et nous l'avons incluse dans le programme.

De cette façon, nous pouvons résoudre le problème en environ 730 sec (CPU et I/O) et la procédure de post-optimisation en 600 sec (CPU et I/O), ce qui est raisonnable pour un problème de cette taille et de cette complexité.

5.4 Performances

Pour pouvoir estimer l'efficacité de l'algorithme, nous comparons quelques mesures de performances obtenues pour la résolution du problème de la S.N.C.F. et pour la résolution d'un problème du C.N. (Crainic 82). Le réseau du C.N. est composé de 75 noeuds et de 95 arcs (en appliquant des règles d'aggrégation propres au C.N.). Parmi les noeuds, deux représentent des points de jonction où il n'est pas possible d'effectuer d'autres opérations que le transfert de wagons d'un service de train à un autre. Les autres noeuds sont soit des gares de triage ou des regroupements de gares de triage. Parmi les arcs, neuf représentent des voies doubles. La période de planification est la semaine (168h). Les données initiales sont aggrégées en 2504 marchés pour 33 groupes de marchandises (tableau 3).

Remarquons que pour le problème du C.N., la même stratégie de segmentation des marchés était utilisée, sauf que le temps d'optimisation des "très petits" marchés n'est pas inclus dans le tableau 4.

Les résultats du tableau 4 sont une bonne indication de l'effort de calcul nécessaire pour résoudre les deux problèmes. Ils sont aussi très satisfaisants, si on considère la complexité des problèmes résolus et l'effort requis pour les résoudre par des méthodes traditionnelles.

Ces résultats montrent que notre approche algorithmique est efficace et suggèrent que cette efficacité ne dépend pas du contexte particulier de son développement.

	S.N.C.F	C.N.
Réseau physique		
Nombre de noeuds	104	75
Nombre de gares	20	73
Nombre d'arcs	156	95
Demande		
Nombre de marchés	1575	2504
Nombre de types de marchandises	1	33
Période de planification	24 h	168 h
Réseau des services		
Nombre de services	236	346
Nombre d'arcs de services	236	655
Nombre de types de services	1	2

TABLEAU 3

Description des deux problèmes

	S.N.C.F	C.N.
Modification des fréquences		
# d'appels de la procédure	40	120
# fréquences modifiées	1157	782
# différences finies calculées	9480	41520
temps d'exécution	23.8 sec	118.0 sec
Distribution du trafic		
par marché	53.8 sec	352.9 sec
par arbre	304.5 sec	52.1 sec
temps total	358.3 sec	404.0 sec
Chemins les plus courts (services)		
# arbres	1196	1606
# chemins	55016	117238
temps d'exécution	82.9 sec	70.0 sec
Génération d'itinéraires		
# arbres	2148	4074
# chemins	37338	13722
temps d'exécution	55.1 sec	315.0 sec
Algorithme de descente	14.1 sec	20.0 sec

TABLEAU 4

Exemple de l'effort de calcul nécessaire pour résoudre les deux problèmes

5.5 Solutions- comparaisons avec MASUP

Pour vérifier l'efficacité du modèle, nous avons examiné quatre approches de solution et nous avons comparé leurs résultats avec ceux de MASUP :

1- Optimisation simple avec le délai de classification modélisé comme une file d'attente M/M/1 ;
2- Optimisation simple avec le délai de classification modélisé comme dans MASUP ;
3- Optimisation et post-optimisation comme dans 1- ;
4- Optimisation et post-optimisation comme dans 2- ;
5- MASUP .

Nous avons examiné et comparé les caractéristiques physiques et économiques des cinq approches de solution.

Le tableau 5 représente les caratéristiques physiques des 5 approches de solution. La solution obtenue pour l'approche 4 (celle qui se rapproche le plus des choix de modélisation de MASUP) retient 230 services. Ils représentent 537 trains. Le trafic est généralement transporté sur un seul itinéraire: seulement 20.3% des marchés utilisent plus de deux itinéraires. Nous avons en moyenne 43 wagons par train, comme le nombre moyen maximum de wagons par train est 52, nous pouvons dire que les trains sont bien chargés. Le pourcentage moyen d'occupation des trains (calculé par rapport à la capacité maximale) est alors 78.5%, ce qui est très bon si on considère les normes des compagnies ferroviaires.

On remarque, dans le tableau 5, qu'une diminution du nombre de services dans les solutions 3 et 4 entraine une augmentation du nombre de trains et des km-trains : l'heuristique de post-optimisation supprime les services trop peu chargés, les wagons appartenant à ces services sont donc transportés sur des chemins plus longs.

	Exp 1	Exp 2	Exp3	Exp 4	Exp 5
# de trains	597	596	548	537	511
# de km-trains	127176	126978	147923	143872	128279
Nombre de services ($t_h \neq 0$)	236	236	230	230	288
# moyen de wagons par service	94	93	99	100	63
# moyen de wagons par train	37	36	41	43	35
Pourcentage moyen d'occupation des trains	69.7	69.3	77.8	78.5	72.5
Parcours moyen des services (km)	250	250	250	250	259
# de wagons reclassifiés	3326	3233	3681	3550	9753
# de marchés utilisant plus de 2 itinéraires (%)	8.9	1.02	5.7	20.3	0.0

TABLEAU 5

Caractéristiques physiques des cinq solutions

Donc, par rapport à MASUP, la charge moyenne des trains est augmentée et le nombre de wagons reclassifié est diminué. En général, une meilleure solution est obtenue, ce qui est confirmé par les résultats du tableau 6.

Les tableaux 6 et 7 représentent les caractéristiques économiques des 5 solutions. Les coûts donnés au départ et les résultats de MASUP étant en francs, nous avons conservé les résultats finaux en francs pour faciliter les comparaisons.

Nous remarquons que les coûts de nos quatre approches de solution sont inférieurs à ceux de MASUP. L'heuristique de post-optimisation fonctionne bien : les coûts des approches 3 et 4 sont meilleurs que ceux de des approches 1 et 2, ce qui prouve que l'utilisation de cette heuristique est importante et utile.

Nous remarquons que l'introduction d'une file d'attente comme délai de classification dimimue le coût de délai des wagons dans les gares de triage et augmente le nombre de wagons reclassifiés. Il faudrait cependant examiner la modelisation dans la classification pour voir quel modèle est le plus réaliste et le plus conforme aux normes de la S.N.C.F.

Le fait de supprimer les services ne satisfaisant pas la contrainte de seuil minimal d'occupation des trains engendre des coûts plus élevés : le trafic circulant sur ces services est transporté sur d'autres plus longs et plus coûteux.

Dans le tableau 7, nous voyons que les coûts sont répartis sensiblement de la même façon dans toutes les solutions. Ce sont les coûts de traction et les km-wagons qui occasionnent les plus grosses dépenses ainsi que le trafic transit et naissant. Pour améliorer la solution, il faudrait donc diminuer le temps de transport des marchandises.

Coûts en francs	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5
Traction (opération)	1 195 747	1 198 114	1 220 607	1 207 304	1 495 899
Km-wagons	1 229 280	1 220 440	1 264 120	1 249 040	1 203 780
Heures-wagons dans les triages	336 235	360 138	362 243	384 285	360 997
Heures-wagons dans les trains	129 378	128 526	133 000	131 526	160 917
Trafic transit et naissant (triage)	823 745	818 566	843 747	839 128	984 396
Total	3 714 385	3 725 784	3 823 717	3 811 283	4 205 989

TABLEAU 6

Caractéristiques économiques des cinq solutions

	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5
Traction	32.20	32.16	31.92	31.68	35.57
Km-wagons	33.10	32.76	33.06	32.77	28.62
Heures-wagons dans les triages	9.05	9.67	9.47	10.08	8.58
Heures wagons dans les trains	3.47	3.45	3.48	3.45	3.83
Trafic transit et naissant	22.18	21.96	22.07	22.02	23.40

TABLEAU 7

Répartition des coûts (en %) dans les cinq solutions

Fréquence	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5
1	22.88	20.76	24.58	25.42	39.94
2	34.75	36.87	36.44	37.71	44.79
3	20.76	22.04	19.07	19.07	12.15
4	14.41	13.14	12.29	9.75	2.08
5	4.66	5.08	2.97	3.39	.69
6	.85	.85	1.26	1.69	.35
7	1.69	1.26	.85	.43	.00
0	.00	.00	2.54	2.54	.00

TABLEAU 8

Répartition du nombre de services selon le niveau de fréquence (en %)

La répartition du nombre de services selon le niveau de fréquence se trouve illustrée dans le tableau 8 et montre clairement des différences significatives. Les fréquences obtenues par MASUP sont généralement plus basses, 15.27% sont supérieures à 2 trains par jour contre 34.33% dans la solution 4. Dans MASUP, une contrainte sur le niveau de fréquence est intégrée au modèle. La S.N.C.F. considère que les services sont bien réglés s'ils se situent dans une zone de charge de 2 à 3 trains par jour. Il est facile d'introduire une telle contrainte dans le modèle, cela n'aurait pas apporté d'informations supplémentaires pour notre but d'analyse.

5.6 Conclusion

Tel que montré par ces résultats qui se comparent très favorablement à ceux de MASUP, l'approche proposée permet une modélisation correcte des divers aspects du transport ferroviaire des marchandises et une adaptation réaliste du modèle au cas particulier de chaque entreprise.

Nous ne pouvons évidemment pas parler d'optimalité. Cependant, d'après les résultats obtenus et les comparaisons avec la solution du modèle MASUP, nous pouvons dire que la méthode obtient, dans un temps raisonnable compte tenu de la complexité et de la taille du problème, une très bonne solution. Nous pouvons également conclure que cette méthode permet une grande flexibilité d'utilisation et peut s'intégrer facilement et efficacement au processsus de planification.

CONCLUSION

L'approche de modélisation présentée ici permet de considérer simultanément et explicitement deux problèmes de planification, soit le design du réseau de service et l'acheminenement du trafic. Tel que montré par les résultats de cette étude, cette approche permet, par sa modularité et sa flexibilité, une modélisation correcte des divers aspects du transport ferroviaire des marchandises et une adaptation réaliste du modèle au cas particulier de chaque entreprise. De plus, ces modèles sont résolus par des algorithmes précis et efficaces dont la stabilité a été vérifiée par ce travail.

Dans ce mémoire, nous avons intégré les problèmes spécifiques de la S.N.C.F. dans le cadre du modèle. Nous avons résolu le problème du seuil minimal d'occupation de train avec une heuristique de post-optimisation efficace. Nous avons étudié le problème d'une solution initiale des services. Le modèle et l'algorithme ont été expérimentés sur le réseau français; les temps d'exécution se sont révélés très bons, ainsi que la solution obtenue. Cette étude ainsi que celles exécutées dans d'autres travaux, ont confirmé que la solution obtenue est de bonne qualité et que notre méthode permet une grande flexibilité d'utilisation, une adaptation simple et efficace aux problèmes de diverses compagnies et peut s'intégrer facilement au processus de planification tactique.

Au niveau tactique, le modèle ne peut pas prévoir toutes les circonstances ni résoudre tous les problèmes. Il peut cependant être utilisé en vue d'élaborer, à partir de prévisions à moyen terme de la demande, un plan d'opération de référence saisonnier pour minimiser les coûts de transport et de manutention des marchandises tout en offrant un service rapide

et fiable. Le planificateur peut alors se servir du modèle en mode opérationnel afin de choisir parmi un certain nombre de solutions celle qui lui semble la plus réaliste et la manipuler jusqu'à ce qu'elle respecte toutes les règles de la planification.

Il reste, cependant, beaucoup de travail à effectuer. Nous croyons qu'il serait nécessaire de développer des modèles d'estimation des coûts, spécialement les coûts de délai pour les différentes classes de trafic. Des améliorations sont probablement possibles au niveau des coûts de pénalité imposés lors des dépassements de capacité. L'insertion de cette méthodologie dans un logiciel intégré d'aide à la planification, comprenant une interface interactive-graphique et une banque de données, permettrait aux planificateurs de générer et d'évaluer plus facilement et plus efficacement un grand nombre de stratégies d'opération ou de développement amenant ainsi une amélioration de la qualité des plans de transport.

BIBLIOGRAPHIE

ASSAD, A.A., "Modelling of Rail Networks : Toward a Routing/Make-up Model", Transportation Research 14B, 101-114 (1980).

BAZARAA, M.S. et SHETTY, C.M., "Nonlinear Programming Theory and Algorithms", Wiley,(1979).

BOCK, F., KANTNER, H. et HAYNES, J., "An Algorithm for Finding and Ranking Paths Through a Network", Research Report, Armour Research Foundation, Chicago (1957).

CLARKE, S., KRIKORIAN, A. et RAUSAN, J., "Computing the N Best Loopless Paths in a Network", J. of Siam, Vol. 11, No. 4, 1096-1102,(1963).

CRAINIC, T.G., "Un modèle de planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises", publication #247, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal,(1982).

CRAINIC, T.G., " Planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises", Routes et Transports, 18-24 (1984a).

CRAINIC, T.G., "A Comparison of Two Methods for Tactical Planning in Rail Freight Transportation", Operationnal Research'84, J.P. Brans (éditeur), North-Holland (1984b).

CRAINIC, T.G., FERLAND, J.A. et ROUSSEAU, J.M., "A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation", Transportation Science 18, 165-184 (1984c).

CRAINIC, T.G. et ROUSSEAU, J.M., "Multicommodity, Multimode Freight Transportation : A General Modelling and Algorithmic Framework for the Service Network Design Problem", Transportation Research B, 20, 225-242 (1986).

CRAINIC, T.G. et ROY, J., "O.R. Tools for Tactical Freight Transportation Planning", publication #398, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal (1985a).

CRAINIC, T.G., NICOLLE, M.-C., "Planification tactique du transport ferroviaire de marchandises : quelques aspects de modélisation", Actes du Premier Congrès International en France de Génie Industriel, CEFI-AFCET-GGI (1986).

CRAINIC, T.G. et GENDREAU, M., "Approximate Formulas for the Computation of Connection Delays under Capacity Restrictions in Rail Freight Transportation", publication #438, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal (1985b).

DELORME, L., CRAINIC, T.G. et ROY, J., "Une nouvelle approche pour la planification des opérations de transport des marchandises", publication #444, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal,à paraître dans Routes et Transports (1986).

DREYFUS, S.E., "An Appraisal of Some Shortest-Path Algorithms", Operations Research 17, 395-412 (1969).

HOFFMAN, W. et PAVLEY, R., "A Method for the Solution of the Nth Best Problem", J. of the ACM, 6, 506-514 (1959).

LATOUR, D., " Une étude des méthodes de calcul des K-plus courts chemins" à paraitre (1986).

LAWLER, E.L., "A Procedure for Computing the K Best Solutions to Discrete Optimisation Problems and its Application to the Shortest Path Problem", Management Science, 18, 401-405 (1972).

LAWLER, E.L., "Combinatorial Optimization : Networks and Matroids", Ed. Winston (1976).

PAYRAUD, R., "La modélisation du transport de marchandises : le modèle MASUP", Revue générale des chemins de fer, 743-750 (1981).

PETERSEN, E.R., "Bulk Service Queues : With Application to Train Assembly Time", Report 71-2, CIGGT, Queen's University (1971a).

PETERSEN, E.R., "Bulk Queues with Random Batch Size : With Application to Railroad Modelling", Report 71-3, CIGGT, Queen's University (1971b).

PETERSEN, E.R., "Railyard Modelling - Part I : Prediction of Putthrough Time", Transportation Science 11, 37-49 (1977).

ROY, J., "Un modèle de planification globale pour le transport routier des marchandises", thèse de doctorat en administration, Ecole des H.E.C., Montréal, publication #402, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal (1984).

SAKAROVITCH, M., "The K Shortest Routes and the K Shortest Chains in a Graph", Operation Research Center, University of California, Berkeley, Report ORC-32 (1966).

TURNQUIST, M.A. et DASKIN, M.S., "Queuing Models of Classification and Connection Delay in Railyards", Transportation Science 16, 207-230 (1982).

YEN, J.Y., "Finding the K Shortest Loopless Path in a Network ", Management Science, 17, 712-716 (1971).

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier mon directeur de recherche M. Téodor Crainic pour ses conseils, sa disponibilité et son appui tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier également M. J. Rabouel du département RX de la direction des études, de la planification et de la recherche de la S.N.C.F. qui nous a fourni les données.

Je remercie Mlle Lucie Bibeau pour ses nombreux conseils et encouragements au cours de la rédaction de ce travail, ainsi que Mlle Lucie L'Heureux pour son aide et ses conseils pour dactylographier ce mémoire.

Finalement, je tiens à remercier M. François Tremblay pour ses encouragements et son soutien pendant ces deux années.